



Henrique Gapo
Oliveira

Plataforma de medida com suporte para
mobilidade





**Henrique Gapo
Oliveira**

**Plataforma de medida com suporte para
mobilidade**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Rui Aguiar, Professor Catedrático do Departamento Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

José Luís Vieira Cura

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (por delegação da Reitora da Universidade de Aveiro)

vogais / examiners committee

Rui Luís Andrade Aguiar

Professor Catedrático de Universidade de Aveiro (orientador)

Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar de Universidade Aveiro

agradecimentos / acknowledgements

Quero agradecer primeiro à minha família que sempre conseguiu auxiliar em todas as áreas essenciais para o meu desenvolvimento quer pessoal quer profissional. De seguida, agradecer ao meu orientador Rui Aguiar pelo tempo e paciência durante o desenvolvimento desta Tese de Mestrado. A conceção de placas PCB e o fornecimento de produtos necessários para o desenvolvimento deste sistema, nunca seria possível sem a ajuda do senhor Pedro Gonçalves. O senhor Pedro, ajudou-me ao longo desta Tese a transportar o veículo para o circuito, como também ao aperfeiçoamento do sistema em termos mecânicos. Para finalizar, queria dizer um obrigado a todos os meus amigos que foram fundamentais pela força e motivação.

Resumo

O Instituto Telecomunicações possui uma iniciativa denominada AMazING (*Advanced Mobile wireless Network playGround*). Esta consiste numa *test-bed*, ou seja, uma rede de testes sem fios, constituída por 24 nós fixos espalhados pelo terraço do departamento, que permite a recriação de cenários reais e emulados. Posteriormente, foi adicionado no terraço um circuito metálico, que é percorrido por um veículo que tem embutido um motor eléctrico sem escovas, que irá ter como função de nó móvel, promovendo assim o conceito de mobilidade a esta rede de testes. Este documento foca-se principalmente no controlo de velocidade, como também na localização do veículo no circuito em tempo real.

Abstract

The Institute of Telecommunications has a project known as AMazING (Advanced Mobile wireless Network playGround) this is basically a testbed platform. In other words, is a wireless network for testing, based on 24 fix nodes spread over the rooftop of the department that allows to replicate and emulate real enviroments. Afterwards, a metallic circuit was implemented into the network to suport a electric vehicle with brushless motor DC that was a function to be a mobile node that brings to this network the concept of mobility. This document will focus only on the speed control of the electric motor as well as the location of the vehicle in real time.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação/Enquadramento	1
1.1.1 Objetivos	4
1.1.2 Estrutura do documento	5
2 Motores Elétricos	6
2.1 Campo eletromagnético	6
2.1.1 Campo magnético	6
2.1.2 Campo magnético de um fio com corrente	8
2.1.3 Força magnética sobre condutores com corrente	10
2.1.4 Indução eletromagnética	10
2.2 Funcionamento de um motor DC	11
2.2.1 Funcionamento de um motor DC	12
2.3 Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC)	13
2.3.1 Estrutura de um motor BLDC	13
2.3.2 Funcionamento de um motor BLDC	14
2.3.3 Controlador e comutação	15
2.3.4 Comparação com o motor DC com escovas e sem escovas	17
3 Comunicação Sem Fios	19
3.1 <i>Internet of Things</i> (IoT)	19
3.2 Aplicações IoT	20
3.3 Rede de sensores sem fios	20
3.3.1 <i>Stack</i> de uma rede de sensores sem fios	21
3.3.2 Topologia de rede	22
3.4 Módulo de comunicação	23
3.4.1 Consumo de energia	23
3.4.2 Frequência	24
3.4.3 Ambiente da aplicação	25
3.4.4 Alcance	25
3.4.5 Taxa de transmissão	31

3.4.6	Modos de transmissão	32
3.4.7	Comparação entre tecnologias de comunicação sem fios	32
	LoRa WAN	34
	NWave	34
	SigFox	35
	Cellular	35
	<i>Radio Transceiver</i>	36
	<i>Bluetooth</i> e BLE	36
	Wi-Fi	36
	ZigBee	36
	Z-Wave	37
4	GNSS	38
4.1	Arquitetura de um sistema GNSS	38
4.2	Sistemas GNSS	40
4.2.1	Sinais GNSS	41
4.3	Determinação da posição	41
4.3.1	DGNSS e RTK	43
5	Solução Proposta	46
5.1	Estrutura da plataforma	46
5.2	Veículo	47
5.2.1	Especificações do Motor Elétrico	48
	Fonte de alimentação	48
	Fases do motor	48
	Fases de Hall	48
	Acelerador/ <i>Cruise-Control</i> /Luzes	49
	Velocímetro	49
	Regulador de tensão	50
	Regulador de potência	50
	Travões	50
5.3	Estrutura do sistema para o comando wireless do veículo	50
6	Implementação	53
6.1	Subsistemas acoplados ao veículo	53
6.1.1	Micro-controlador	53
6.1.2	Controlo de velocidade	54
	Substituição manípulo analógico	55
	Leitura da velocidade	57
	Implementação de um controlador PID	60
	Máquina de estados do veículo	62
6.1.3	Sentido de rotação	64
6.1.4	Sistema de segurança	70
6.1.5	Estado das baterias	74
6.2	Interface do utilizador	74
6.2.1	Micro-controlador	74
6.2.2	Interface gráfica	75

	Servidor-Cliente	75
6.3	Módulo <i>wireless</i>	79
6.3.1	Configuração	82
6.3.2	Comunicação	83
	Módulo conectado ao servidor	84
	Módulo acoplado ao veículo	86
6.4	Sistema de posição	88
6.4.1	Módulo RTK embutido no veículo	92
6.4.2	Módulo RTK - Base	94
	Definição da posição	96
7	Resultados	97
7.1	Acelerador/Leitura da velocidade a partir do filtro passa baixo	97
7.1.1	Convergência do sistema de posição	98
7.1.2	Comportamento do veículo ao longo do circuito	108
7.1.3	Trajetória do veículo consoante a posição da base	112
8	Conclusões	113
8.0.1	Trabalho futuro	113
	Bibliografia	115
9	Apêndice	119
9.1	Placa PCB	119
9.1.1	Placa embutida no veículo	119
9.1.2	Placa PCB fixa	120

Lista de Figuras

1.1	Constituição da testbed implementada no terraço do Instituto Telecomunicações.	2
1.2	Interior de um nó.	3
1.3	Rede AMaZING.	3
1.4	Carril metálico.	4
1.5	Veículo sobre o carril metálico.	4
2.1	Campo magnético de um íman.[1]	7
2.2	Comportamento repulsivo entre dois ímanes[2].	7
2.3	Comportamento atrativo entre dois ímanes[2].	7
2.4	Campo magnético de um fio retilíneo[1].	8
2.5	Regra da mão direita[3].	8
2.6	Campo magnético de uma bobina[4].	9
2.7	Determinação dos polos magnéticos coma regra da mão direita [3].	9
2.8	Regra da mão esquerda[5].	10
2.9	Constituição de um simples motor DC com escovas[2].	11
2.10	Campos magnéticos gerados no motor DC [6].	12
2.11	Rotor de um motor DC constituído por várias espiras e comutador [2].	12
2.12	Constituição de um motor sem escovas[7].	13
2.13	(a) Montados à superfície (b) Embutidos (c) Intercalados [3].	14
2.14	Estatador de um motor BLDC [8].	14
2.15	Teoria da rotação de um motor BLDC [3].	15
2.16	Ponte-H que alimenta as três fases do motor BLDC[7].	15
2.17	Estados das fases de Hall [7].	16
2.18	Posicionamento dos sensores de Hall[9].	17
3.1	Dispositivos conectados em 2020 [10].	19
3.2	Arquitetura de um nó [11].	21
3.3	Estrutura do modelo simplificado para sensores sem fios [12].	21
3.4	Tipologia Estrela [13].	22
3.5	Tipologia <i>mesh</i> [13].	23
3.6	Tipologia árvore [13].	23
3.7	Frequências não licenciadas a nível Mundial.[14]	24
3.8	Algumas aplicações que existem e a frequência que é utilizada[15].	25
3.9	Ilustração dos parâmetros acerca do alcance entre o transmissor e um recetor[16].	26
3.10	Demonstração da degradação da potência do sinal transmitido até chegar ao recetor[16].	27

3.11	Absorção de energia em determinados obstáculos [16].	28
3.12	Multipathing.[16]	28
3.13	Zonas de Fresnel[17].	29
3.14	Cálculo da Zona de Fresnel [18].	29
3.15	Comunicação eficiente na primeira zona de Fresnel [18].	30
3.16	Exemplo do efeito Doppler [19].	31
3.17	Alcance de acordo com a data rate do módulo de comunicação [20].	31
3.18	<i>Half-duplex</i> [21].	32
3.19	<i>Full-duplex</i> [21].	32
3.20	Características de vários módulos IoT [22].	33
3.21	Estrutura de uma rede LoRaWAN [23].	34
3.22	Sistema de localização de posições vagas para colocar o veículo [24].	35
3.23	Arquitetura da rede SigFox [25].	35
3.24	Exemplo de aplicação Z-Wave [26].	37
4.1	Segmentos de um sistema GNSS [27].	38
4.2	Rede de controlo do sistema GPS [28].	39
4.3	Espectro dos sinais GNSS [29].	41
4.4	Envio/receção da onda portadora [27].	42
4.5	Determinação da posição de um recetor GNSS [30].	42
4.6	Fontes de erro no cálculo da posição [27].	43
4.7	Estrutura de um sistema DGPS [31].	44
4.8	Estrutura de sistema RTK [27].	44
4.9	Sistemas GNSS [32].	45
5.1	Carril metálico.	46
5.2	Veículo constituído por peças de uma bicicleta elétrica.	47
5.3	Estrutura do sistema desenvolvido.	51
6.1	Esquema do Arduino Leonardo.	54
6.2	Composição do módulo MCP4921.	55
6.3	Esquemático relativo ao acelerador.	55
6.4	Comunicação entre o micro-controlador e a DAC.	56
6.5	Circuito relativo à leitura de velocidade	57
6.6	Comportamento do circuito passa-baixo.	58
6.7	Diagrama de Bode.	59
6.8	Saída do filtro passa-baixo.	59
6.9	Controlador PID [33].	60
6.10	Controlador PID.	61
6.11	Execução da máquina de estados.	63
6.12	Máquina de estados.	63
6.13	Esquema de um relé DPDT.[34]	66
6.14	Relé G2R-2-S DC5(S).	66
6.15	<i>Socket</i> associado ao relé G2R-2-S DC5(S).	67
6.16	Esquemático relativo à mudança de fases do motor.	67
6.17	Estrutura do módulo LLC120.	69
6.18	Circuito que produz a troca das fases de Hall.	69

6.19	Sequência de blocos executados pelo <i>software</i> .	70
6.20	Esquema do módulo de segurança.	71
6.21	Estrutura do módulo SN74LS123N.	71
6.22	Diagrama temporal do módulo SN74LS123N.	72
6.23	Funções do módulo SN74LS123N.	72
6.24	Circuito relativo ao cálculo da janela temporal.	72
6.25	Opto-isolador AQY275.	73
6.26	Raspberry Pi 3.	74
6.27	Comunicação por web sockets entre servidor e cliente.	76
6.28	Interface gráfica.	76
6.29	Trajetoória do veículo e o ponto central.	77
6.30	Diferença gerada entre os pontos do veículo com o ponto central.	77
6.31	Aproximação <i>spline</i> .	78
6.32	Gerar pontos para o <i>front-end</i> .	78
6.33	Varrimento de frequência com veículo em funcionamento.	79
6.34	Varrimento de frequência com veículo desligado.	80
6.35	Diferença com o veículo em funcionamento e desligado.	80
6.36	Diagrama do circuito integrado RFM69HCW.	81
6.37	Esquema do módulo RF com o Arduino Leonardo.	82
6.38	Trama do utilizador para o servidor.	84
6.39	Diagrama do módulo RF acoplado ao utilizador.	85
6.40	Estrutura do pacote do veículo para o servidor.	86
6.41	Diagrama de comunicação por parte do módulo RF embutido no veículo.	87
6.42	Estados e comunicação por parte dos módulos RF. RX - Recepção; TX - Transmissão; STDBY - <i>StandBy</i> .	88
6.43	Módulo GPS-RTK: NS-HP-GL-10.	89
6.44	Software GNSS Viewer.	90
6.45	Estrutura do sistema RTK.	91
6.46	Módulo Bluetooth - RN-41.	91
6.47	Esquema do sistema GPS-RTK embutido no veículo.	92
6.48	Constituição da mensagem GGA.	93
6.49	Constituição da mensagem RMC.	93
6.50	Constituição da mensagem STI,030.	94
6.51	Esquema do sistema GPS-RTK com a função de base.	95
6.52	Módulo USB-UART.	95
6.53	Posição do módulo GPS-RTK com a função de base.	96
7.1	Velocidade em função dos bits colocados no módulo DAC.	97
7.2	Velocidade em função tensão de saída do módulo DAC.	98
7.3	Resultados da primeira experiência.	99
7.4	Resultados da segunda experiência.	99
7.5	Resultados da terceira experiência.	100
7.6	Resultados da quarta experiência.	100
7.7	Resultados da quinta experiência.	101
7.8	Resultados da sexta experiência.	101
7.9	Resultados da oitava experiência.	102
7.10	Resultados da nona experiência.	102

7.11	Resultados da décima experiência.	103
7.12	Resultados da décima primeira experiência.	103
7.13	Resultados da décima segunda experiência.	104
7.14	Resultados da décima terceira experiência.	104
7.15	Resultados da décima quarta experiência.	105
7.16	Diferença em metros de todas as experiências.	106
7.17	Resultados apenas com o estado Float RTK.	107
7.18	Resultados com o estado Float RTK.	107
7.19	Diferença entre o resultados com o estado RTK e <i>Float</i> RTK.	108
7.20	Circuito à velocidade 5 km/h.	109
7.21	Circuito à velocidade 10 km/h.	109
7.22	Circuito à velocidade 15 km/h.	110
7.23	Circuito à velocidade 10 km/h sem precisão RTK.	111
7.24	Diferença entre o estado RTK e o estado FRTK.	111
7.25	Registo da posição do veículo em função das coordenadas da base.	112
9.1	Disposição dos módulos na placa PCB embutida no veículo.	119
9.2	Ligação entre a placa PCB e o controlador do motor elétrico.	120
9.3	Distribuição dos módulos na placa PCB fixa.	120
9.4	Ligação entre placa PCB e o Raspberry Pi 3.	121

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre o motor DC e BDLC [9].	18
5.1	Especificações da fonte de alimentação.	48
5.2	Especificações das fases do motor.	48
5.3	Especificações das fases de Hall.	49
5.4	Especificações do acelerador.	49
5.5	Especificações do velocímetro.	49
5.6	Especificações do regulador de tensão 60-12V.	50
5.7	Combinações que regulam a potência do veículo.	50
6.1	Ligação entre o controlador do motor elétrico e a DAC.	56
6.2	Bits de configuração do módulo MCP4921.	56
6.3	Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo- Amarelo/ Verde-Verde/Azul-Azul.	64
6.4	Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo- Verde/ Verde-Amarelo/Azul-Azul.	64
6.5	Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo- Amarelo/ Verde-Azul/Azul-Verde.	65
6.6	Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo- Azul/ Verde-Verde/Azul-Amarelo.	65
6.7	Ligação entre Raspberry Pi e RFM69HCW.	82
6.8	Configuração do módulo RFM69HCW.	83

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação/Enquadramento

O avanço tecnológico que estamos a presenciar é absolutamente extraordinário, pois existe a vontade e o querer permanente de melhorar e criar novas metodologias para uma melhor experiência e qualidade de vida.

Esta fonte de desenvolvimento pode ser confirmada empiricamente, através do crescimento de dispositivos e objetos físicos conectados a uma rede. Estes são capazes de interagir uns com os outros e, em cooperação, alcançar objetivos comuns. Isto está englobado no conceito denominado *Internet of Things*. Esta área possui um leque enormíssimo de aplicações, onde as comunicações sem fios têm um papel predominante.

Antes de se lançar um produto ou um serviço, é necessário a realização de testes com as condições do nosso quotidiano, com o objetivo de cumprir certos requisitos e níveis de performance. Existem vários simuladores de software que permitem a análise e a avaliação de novas tecnologias sem fios. No entanto, ainda é difícil convencer a indústria, como também a comunidade, para a adoção de certas inovações sem testes práticos, ou seja, sem a implementação de um determinado sistema num ambiente real com utilizadores reais. Este tipo de testes demoram muito tempo a ser realizados e são bastantes dispendiosos a nível financeiro. De modo a colmatar esta situação, existe cada vez mais a realização de testes em *testbeds*, que são uma plataforma em pequena escala, constituída por uma rede física de testes para desenvolver e analisar novas tecnologias de redes sem fios, de maneira a replicar várias condições que existem no nosso mundo.

O Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, criou um projeto denominado AMazING (*Advanced Mobile wIreless Network playGround*). Este consiste numa rede de testes implementada no próprio terraço, tal como é possível visualizar na próxima figura.

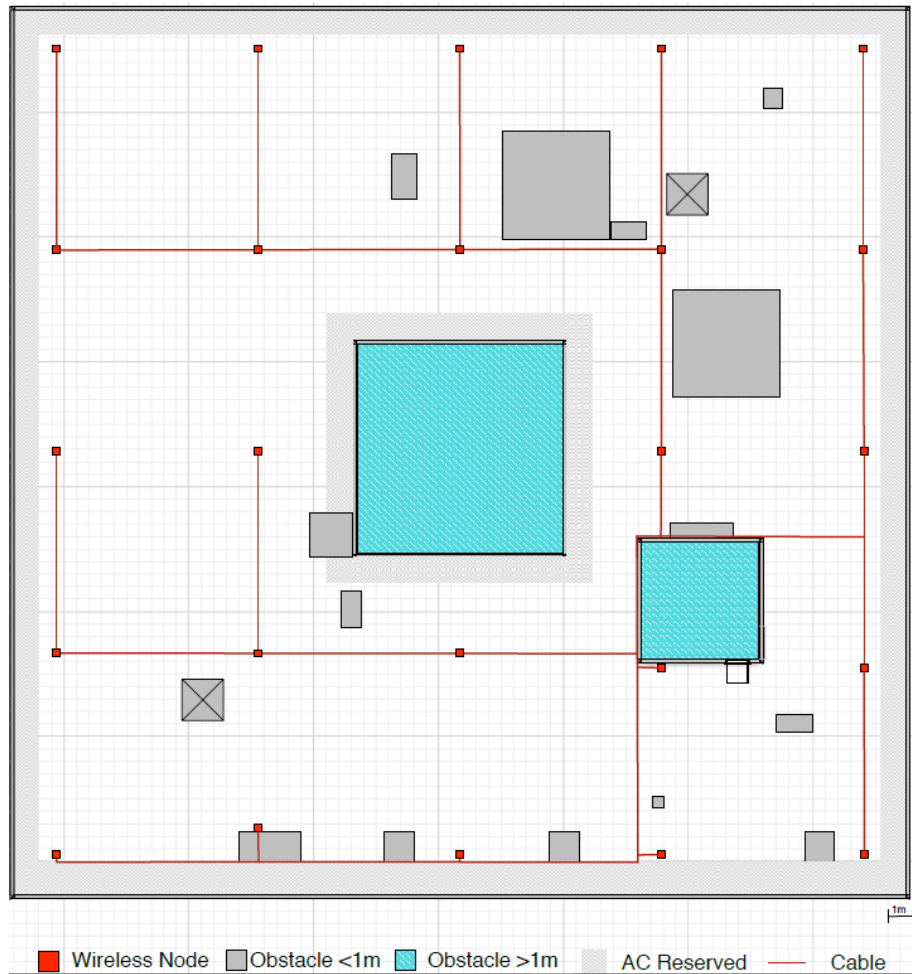


Figura 1.1: Constituição da testbed implementada no terraço do Instituto Telecomunicações.

Esta plataforma surgiu sobre um conceito do professor Rui Aguiar. Esta *testbed* diferencia-se por oferecer ao utilizador um conjunto de opções e funções de controlo da rede, com a reprodução de testes fiáveis e de qualidade. É constituída por um conjunto de 24 nós fixos (figura 1.2 e 1.3), juntamente com um carril (figura 1.4) que dá suporte a um veículo propulsionado por um motor elétrico (figura 1.5). Este veículo tem acoplado um nó, com o objetivo introduzir o conceito de mobilidade nesta rede de testes. Os *nodes* estão ligados a um conjunto de servidores de controlo e monitorização.

Como se pode visualizar através das figuras 1.1, 1.3 e 1.4, existem obstáculos que podem ser prejudiciais para aplicações de redes sem fios. Os obstáculos mais evidentes são o telhado de vidro, observável na figura 1.3 e a cabine de acesso ao terraço, como se pode ver na figura 1.4 à esquerda.



Figura 1.2: Interior de um nó.



Figura 1.3: Rede AMaZING.

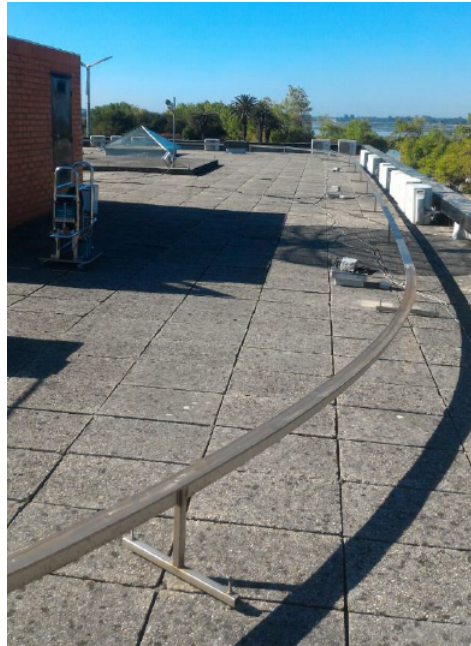


Figura 1.4: Carril metálico.



Figura 1.5: Veículo sobre o carril metálico.

1.1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de controlo de um veículo que tem embutido um motor elétrico, idêntico ao utilizado numa bicicleta elétrica, sobre um carril metálico. O veículo tem de ser capaz de suportar um nó de 3kg, garantindo que a direção, posição e velocidade sejam controladas pelo utilizador. Para isso, este sistema será integrado numa interface WEB. Nesta, o utilizador será capaz não só de definir o estado do veículo, como também visualizar em tempo real a posição e a velocidade instantânea do mesmo.

1.1.2 Estrutura do documento

Os primeiros capítulos são dedicados à compreensão de áreas que estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento deste projeto. Seguidamente, o capítulo 2 explica como funciona um motor elétrico. O capítulo 3, identifica várias tecnologias relevantes à comunicação sem fios e certos aspetos que um utilizador deve ter em conta antes de comprar um módulo de comunicação sem fios. De seguida, no capítulo 4 é feita a descrição dos vários sistemas que existem de navegação por satélite.

O capítulo 5, identifica a solução proposta, onde é descrito a infraestrutura e as ligações importantes para o funcionamento do motor elétrico.

Posteriormente, o capítulo 6 demonstra as metodologias adotadas para o controlo do veículo em termos de posição, velocidade e direção. A criação de uma página WEB para o utilizador interagir também é demonstrada neste capítulo.

Para finalizar, o capítulo 7, são descritos alguns resultados de testes realizados no sistema desenvolvido.

Capítulo 2

Motores Elétricos

O motor elétrico tem como função converter energia elétrica em energia mecânica. Hoje em dia, este equipamento tem um papel bastante importante, pois está integrado em variadíssimos instrumentos que facilitam o desenvolvimento de inúmeras tarefas.

Ultimamente, verifica-se um crescimento da utilização do motor elétrico no sector dos transportes. Este crescimento deve-se à evolução tecnológica ao nível das baterias. Estas são capazes de fornecer maior potência, maior autonomia e cargas menores, contribuindo, desta forma, para um mundo mais ecológico e sustentável, visto que o motor elétrico, em contraste com o motor de combustão, apresenta maior eficiência energética, não emite gases poluentes para a nossa atmosfera e é mais silencioso.

Devido à importância e ao impacto do motor elétrico nos dias de hoje, é pertinente explorar e compreender o seu funcionamento.

2.1 Campo eletromagnético

Os fundamentos relativos ao campo eletromagnético são essenciais para perceber o funcionamento de qualquer motor elétrico. Em seguida, serão apresentados alguns dos conceitos básicos sobre esta temática.

2.1.1 Campo magnético

Um dos dispositivos magnéticos mais utilizados é o íman. Este é constituído por um material ferromagnético que é capaz de criar um campo magnético, sem requerer nenhuma corrente elétrica. O íman possui um polo Norte e um polo Sul, que se localizam nas suas extremidades. As linhas do campo magnético caracterizam-se por serem linhas fechadas que saem do polo Norte e entram no polo Sul, como é possível visualizar na figura 2.1. Por conseguinte, estes materiais produzem forças magnéticas, podem ser orientados de forma a produzir forças atrativas ou repulsivas.

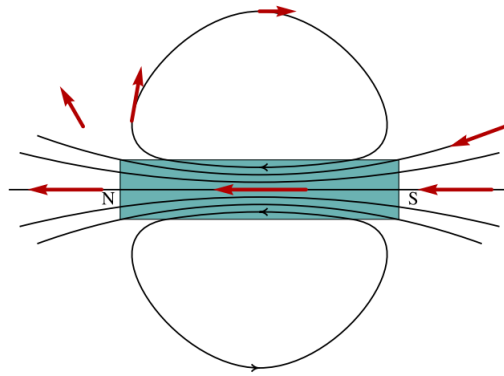


Figura 2.1: Campo magnético de um íman.[1]

- A força repulsiva manifesta-se à medida que se aproximam dois polos equivalentes, exemplificado na figura 2.2.

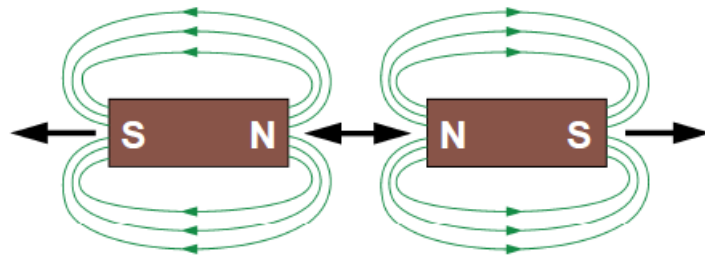


Figura 2.2: Comportamento repulsivo entre dois ímanes[2].

- A força atrativa surge quando se aproximam dois ímanes com polos opostos, tal como é demonstrado na figura 2.3.

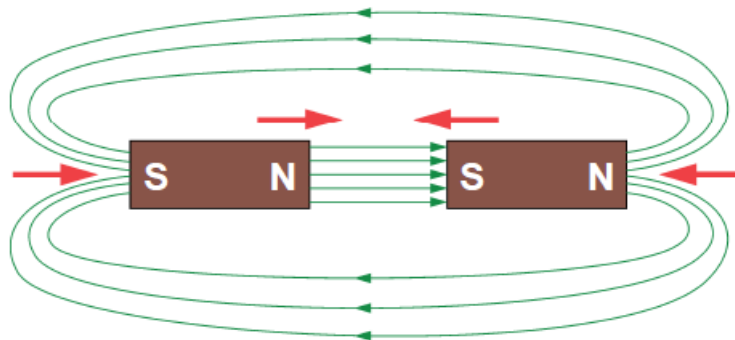


Figura 2.3: Comportamento atrativo entre dois ímanes[2].

2.1.2 Campo magnético de um fio com corrente

Em 1820, o cientista Dinamarquês Christian Ørsted descobriu que a corrente elétrica que passa por um fio cria um campo magnético. Ørsted demonstrou este fenômeno com ajuda de uma bússola, que possui uma agulha magnética que aponta sempre para o eixo Norte-Sul, uma vez que o nosso planeta Terra possui o seu próprio campo magnético, tal como um íman. Ao aproximar a bússola do fio percorrido por uma corrente elétrica, verificou-se que a agulha magnética se afastava cada vez mais do seu eixo original, por outro lado, quando este invertia o sentido da corrente elétrica a agulha magnética deslocava-se no sentido oposto [35][36]. A partir desta observação, foi possível concluir que a corrente elétrica e campo magnético estão correlacionados, como é demonstrado na figura 2.4. O sentido da corrente é indicado por I e o sentido do campo magnético gerado é representado pelo vetor \vec{B} .

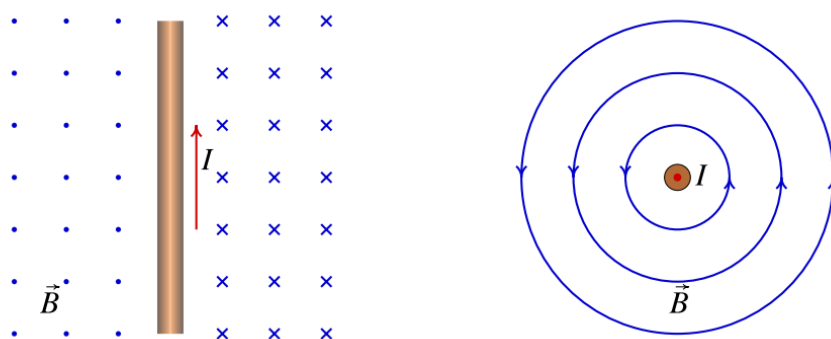


Figura 2.4: Campo magnético de um fio retilíneo[1].

Regra da mão direita: de acordo com a experiência de Ørsted, o sentido da corrente que percorre o fio afeta o sentido do campo magnético. Isto pode ser determinado com ajuda da regra da mão direita. Nesta regra o polegar define o sentido da corrente elétrica e ao fechar os restantes dedos, estes indicam o sentido do campo magnético, tal como é possível observar na figura 2.5.

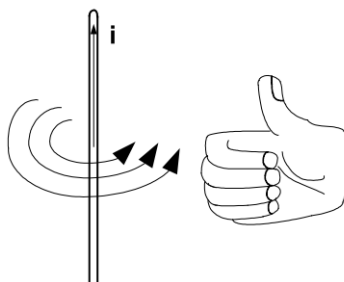


Figura 2.5: Regra da mão direita[3].

Bobina/Eletroímã: A bobina é um componente eletrónico utilizado em muitos circuitos. Este elemento é composto por um fio condutor enrolado em forma helicoidal, tal como uma

mola, onde cada volta completa é designada por espira. Quando a bobina é percorrida por uma corrente I , produz um campo magnético semelhante ao de um íman (estudado na secção 2.1.1), tal como é possível verificar na figura 2.6. O campo dentro do núcleo da bobina é uniforme, e as linhas do campo são paralelas ao seu eixo. Uma vez mais, é possível determinar o polo Norte e Sul com a ajuda da regra da mão direita (figura 2.7), onde o polegar indica o polo Norte e os restantes dedos seguem a corrente que passa pelas espiras. Os polos podem ser facilmente colocados ao contrário se o sentido da corrente for invertido.

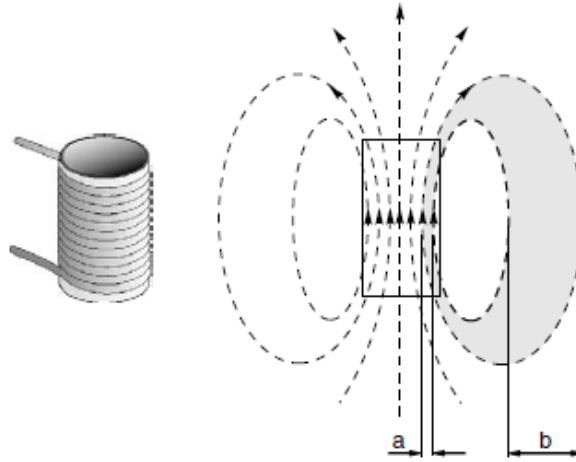


Figura 2.6: Campo magnético de uma bobina[4].

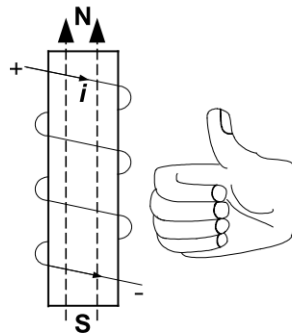


Figura 2.7: Determinação dos polos magnéticos coma regra da mão direita [3].

A densidade do campo magnético no interior da bobina é diretamente proporcional à corrente que passa por uma espira (I), número de espiras (N) e à permeabilidade magnética do meio (μ), como se demonstra seguidamente pela equação:

$$B = IN\mu \quad (2.1)$$

Na prática, para ajudar a concentrar e a dirigir as linhas do campo magnético no interior da bobina, coloca-se um núcleo cilíndrico constituído por vários tipos de materiais para aumentar a constante μ .

2.1.3 Força magnética sobre condutores com corrente

Um campo magnético pode exercer uma força sobre um fio percorrido por uma corrente elétrica (figura 2.8). A força magnética pode ser expressa pela seguinte equação.

$$F = IlB \sin(\theta) \quad (2.2)$$

De acordo com a equação com acima apresentada, a força magnética depende do comprimento do fio(l), como também do ângulo entre a corrente(I) e o campo magnético(B). Para os casos extremos de θ temos:

- Se a corrente que passa pelo fio for paralela às linhas do campo magnético, significa que a força aplicada ao fio é nula, pois $\sin(0^\circ)$ é igual a zero.
- Se a corrente que passa pelo fio for perpendicular às linhas do campo magnético, significa que a força aplicada ao fio é máxima, pois $\sin(90^\circ)$ é igual a um.

O sentido da força pode ser determinado pela regra da mão esquerda, tal como se pode verificar na figura 2.8. O dedo médio indica o sentido da corrente que passa pelo fio (I), o dedo indicador aponta no sentido do campo magnético gerado (B) e por último, o polegar indica a força que será aplicada no fio (F).

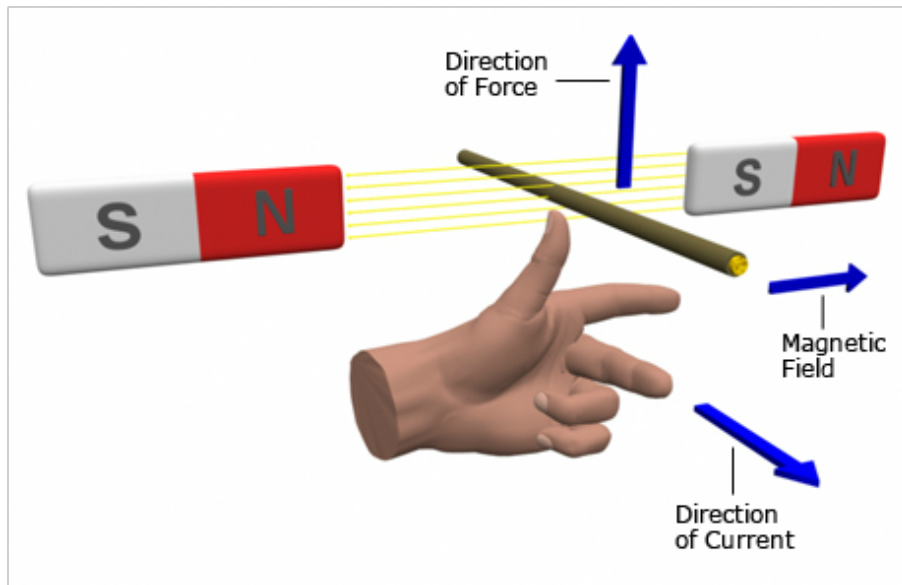


Figura 2.8: Regra da mão esquerda[5].

2.1.4 Indução eletromagnética

O funcionamento de vários aparelhos eletrônicos como transformadores, geradores, alternadores, motores, entre outros, baseiam-se na lei de Faraday. Esta lei enuncia que quando o fluxo magnético varia dentro de uma espira, surge uma força eletromotriz induzida ao longo da mesma. Esta força é representada matematicamente pela seguinte expressão:

$$\xi_i = \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \quad (2.3)$$

Portanto, a força eletromotriz que surge numa bobina irá depender proporcionalmente ao seu número de espiras (N).

$$\xi_i = N \frac{\partial \phi_m}{\partial t} \quad (2.4)$$

O fluxo magnético é uma forma representativa do campo magnético que passa por espira, e pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\phi_m = AB \cos(\theta) \quad (2.5)$$

Onde A representa a área da espira, B intensidade do campo magnético e θ corresponde ao ângulo entre o campo magnético e o vetor normal da espira. Logo, ao variar qualquer um destes parâmetros ao longo do tempo, irá provocar o aparecimento de uma força eletromotriz.

O sentido da corrente provocada pela força eletromotriz e do campo induzido pode ser determinado através da lei de Lenz. Esta lei enuncia que o sentido da corrente depende da variação do campo magnético que lhe deu origem. Se o fluxo magnético diminuir, será criada uma corrente que gerará um campo magnético no mesmo sentido do fluxo magnético, de modo a compensar essa diminuição. O contrário verifica-se caso haja um aumento do fluxo magnético.

2.2 Funcionamento de um motor DC

Após perceber os principais fundamentos sobre eletromagnetismo, torna-se mais fácil perceber o funcionamento de um motor DC simples. Através da figura 2.9, é possível verificar que um motor DC é composto por duas secções importantes:

Rotor: tem a funcionalidade de gerar a rotação do motor. Este componente é constituído por uma armadura que tem uma ou várias espiras. Os terminais da armadura estão diretamente ligados a um comutador mecânico com escovas. Este tem a função de definir o sentido da corrente adequado para cada espira, e assim, efetuar com sucesso a rotação do motor.

Estató: parte exterior do motor. É constituído por um ímã permanente, que dá origem a um campo magnético fixo.

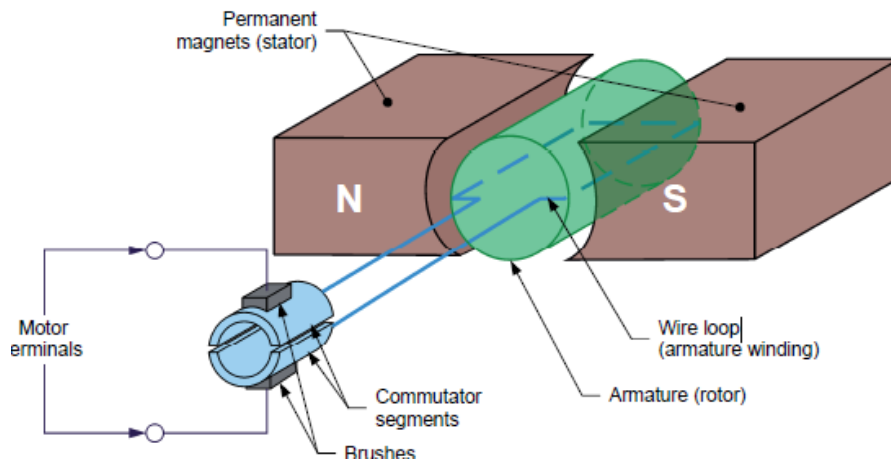


Figura 2.9: Constituição de um simples motor DC com escovas[2].

2.2.1 Funcionamento de um motor DC

Ao aplicar uma certa corrente na espira é produzido um campo magnético. Este irá interagir com o campo magnético criado pelos polos do íman permanente. A interação entre estes dois campos magnéticos origina uma força na espira, tal como foi estudado no secção 2.1.3, no que resulta a rotação do rotor(figura 2.10).

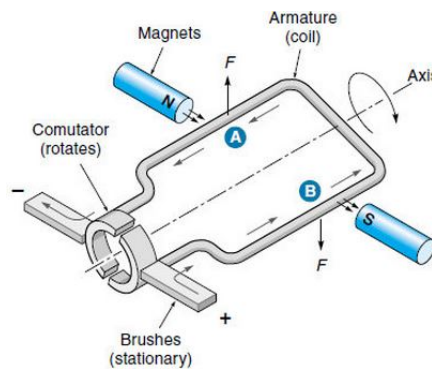


Figura 2.10: Campos magnéticos gerados no motor DC [6].

Para que a armadura possa continuar a rodar ao longo do tempo, o fluxo da corrente na espira deve ser invertido. Esta é a principal função do comutador de anel ranhurado, que está em contacto com as extremidades da espira. O comutador é constituído por uma série de lâminas condutoras de cobre, e ranhuras não condutoras (figura 2.11). A circulação da corrente que atravessa a espira é assegurada por contactos denominados por escovas de carvão. À medida que as escovas passam de uma secção do comutador para outra, a circulação da corrente na armadura é invertida, permitindo desta forma a rotação do motor em torno do seu eixo.



Figura 2.11: Rotor de um motor DC constituído por várias espiras e comutador [2].

Quando a espira se encontra perpendicularmente ao campo magnético criado pelo motor DC, a força aplicada na armadura não contribui para a rotação do motor, e é realizada uma comutação devido à passagem de uma ranhura no comutador. Esta situação contribui para uma rotação irregular do motor. Para colmatar este problema, colocam-se mais espiras na armadura (figura 2.11), para garantir que em qualquer posição do rotor existe sempre uma força útil para a rotação do mesmo, promovendo desta forma uma força constante à carga.

2.3 Motor *Brushless* DC (BLDC)

O motor sem escovas, tal como o seu nome indica, não utiliza o modelo mecânico de comutação com escovas, descrito na secção 2.2. Para substituir o uso das escovas, este emprega uma comutação eletrónica, com a ajuda de transístores de potência, que conseguem estabelecer o sentido da corrente de acordo com a posição do rotor.

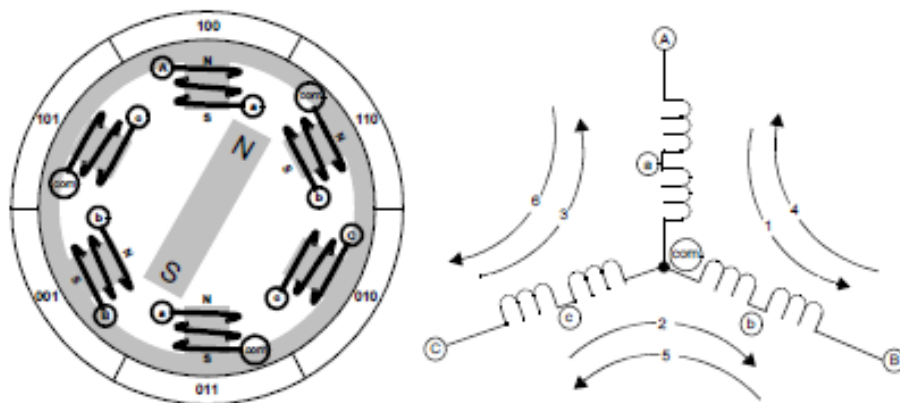


Figura 2.12: Constituição de um motor sem escovas[7].

2.3.1 Estrutura de um motor BLDC

O motor sem escovas tem duas partes essenciais: o rotor e o estator.

Rotor: é constituído por ímanes permanentes e podem variar entre dois a oito pares de polos. Cada par tem um polo Sul (S) e um polo Norte (N), e podem estar dispostos de diferentes maneiras, como se observa na figura 2.13[37][3]. É necessário escolher o melhor material magnético para construção do rotor do motor, de modo a que a densidade do campo magnético seja a desejada. Os ímanes de ferrite são os mais tradicionais e relativamente mais baratos porém, a densidade magnética que estes oferecem é menor em comparação a um íman de terras-raras. Os últimos promovem ao nível da construção do rotor, a diminuição do seu tamanho e peso, mantendo as mesmas características[9].

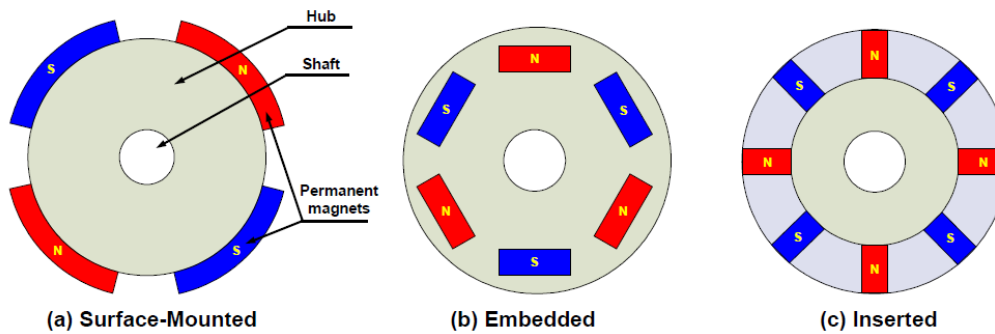


Figura 2.13: (a) Montados à superfície (b) Embutidos (c) Intercalados [3].

Estator: O estator mais comum é o de 3 fases. Cada fase está ligada diretamente a uma bobina com a função de criar um campo magnético consoante o sentido da corrente que é aplicada, tal como foi apresentado no ponto 2.1.3. As comutações são realizadas no estator com ajuda de um controlador externo ao motor. Uma das funções do controlador externo é aplicar correntes específicas a cada uma das fases, o que potencia a variação do campo magnético do estator, essencial para a rotação do rotor.

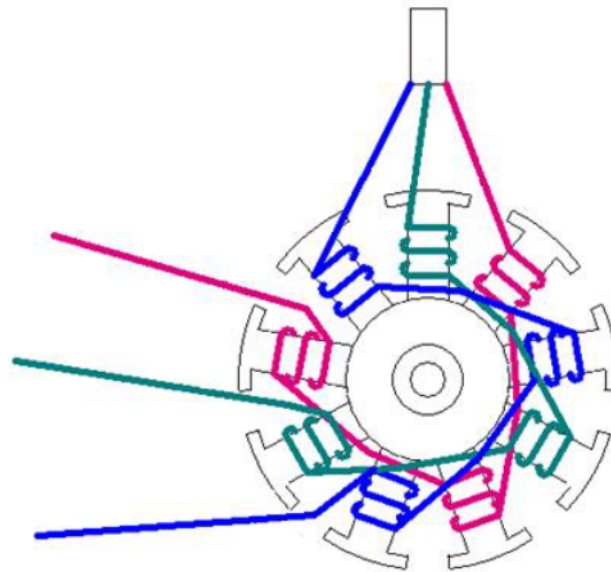


Figura 2.14: Estator de um motor BLDC [8].

2.3.2 Funcionamento de um motor BLDC

O modo que o motor sem escovas realiza a rotação do rotor é muito simples, visto que este sistema se baseia essencialmente na atração e repulsão entre os polos magnéticos. Através da figura 2.15, podemos verificar que o processo começa quando é aplicada uma corrente numa das fases. Essa corrente vai originar dois polos no estator (Norte-Sul), atraindo desta forma os polos opostos do íman permanente que está inserido no rotor. Ao passar a corrente para

a bobina adjacente, vai provocar, uma vez mais, o mesmo processo de atração entre os polos magnéticos gerados pelo estator com os polos opostos do íman permanente. Seguindo esta sequência é possível que o rotor do motor complete uma volta.

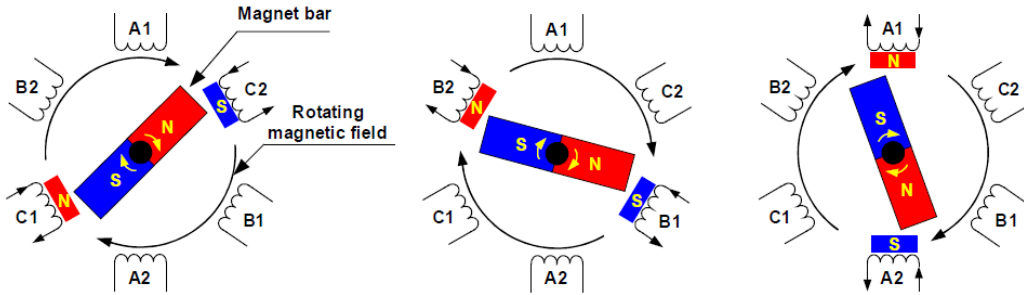


Figura 2.15: Teoria da rotação de um motor BLDC [3].

Porém, este não é o processo mais eficiente, visto que ao colocar corrente em apenas uma das fases, a força exercida no rotor não é constante. Para diminuir este problema, colocam-se duas fases a exercer força no rotor ao mesmo tempo, assim é possível garantir que a força exercida na carga é constante, independentemente da posição do rotor.

2.3.3 Controlador e comutação

Como já foi referido, a comutação é realizada através de um controlador externo, que possui transistores de potência que estão montados de maneira idêntica a uma ponte-H (figura 2.16). Estes conseguem alimentar as três fases e gerar as seis combinações de comutações possíveis através do sinal que é aplicado na base de cada um dos transistores (figura 2.17). Em cada comutação, o rotor roda em torno do seu eixo 60 graus.

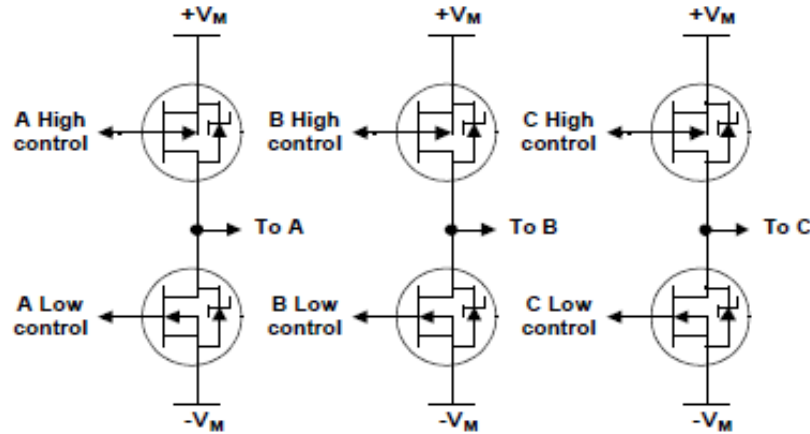


Figura 2.16: Ponte-H que alimenta as três fases do motor BLDC[7].

O sinal de saída nos transistores normalmente é um sinal *pulse-wide-modulation* (PWM). Este sinal é uma onda quadrada, permitindo que seja possível mudar o seu *duty-cycle* e ao mesmo tempo a velocidade do motor. Este tipo de sinal possui as seguintes vantagens[38]:

- Facilidade da sua implementação num micro-controlador. Apenas necessita de uma saída digital para efetuar o controlo da velocidade.
- O motor controlado por PWM possui maior binário, pois os pulsos usam a mesma amplitude da fonte de alimentação em intervalos pequenos.

No entanto, para saber o preciso momento em que o controlador necessita executar uma das seis comutações possíveis, é necessário o conhecimento da posição em que se encontra o rotor. A solução existente em muitos dos motores sem escovas são sensores de Hall. Estes estão localizados no estator, como demonstrado na figura 2.18. A cada 60 graus da rotação do motor está associado um código, através da leitura destes sensores (figura 2.12). Com o feedback da leitura dos sensores de Hall, o controlador consegue identificar a posição do rotor e executar, assim que necessário, a comutação ideal para continuar a rotação do motor. Tendo em conta a figura 2.12, é possível ver na figura 2.17 a relação entre a leitura das fases de Hall com as fases de rotação do motor BLDC (representadas na figura 2.16). É notório que cada transistor fica a conduzir corrente a 120 graus, e que cada comutação é efetuada de 60 em 60 graus.

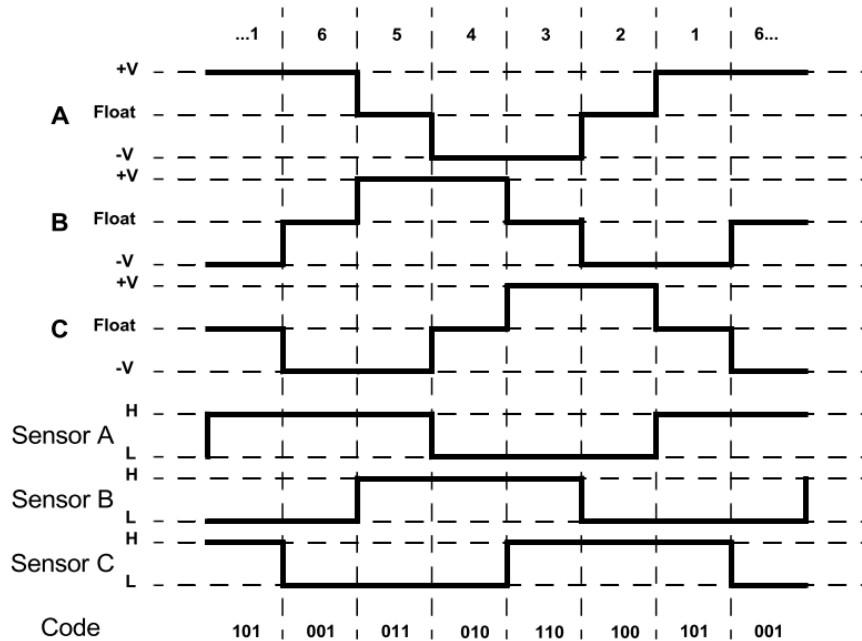


Figura 2.17: Estados das fases de Hall [7].

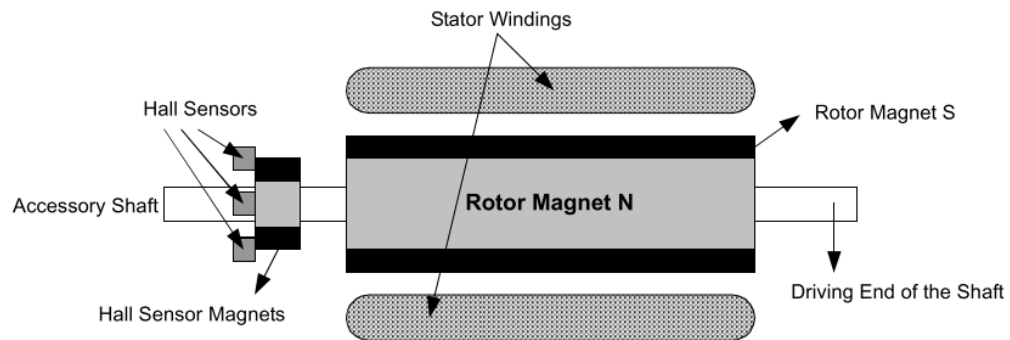


Figura 2.18: Posicionamento dos sensores de Hall[9].

2.3.4 Comparação com o motor DC com escovas e sem escovas

O motor elétrico sem escovas (*BDLC*) é mais complexo por necessitar de um controlador externo e apresenta um maior custo comparado ao motor com escovas. No entanto, a próxima tabela demonstra as vantagens da implementação de um motor *BDLC* em contraste com o motor DC.

Características	Motor com escovas	Motor sem escovas	Vantagens do motor <i>BDLC</i>
Comutação	Comutador mecânico com escovas	Comutação eletrotécnica de acordo com a posição do rotor	Transistores substituem o comutador mecânico.
Eficiência	Alta	Média	Queda de tensão no controlador é menor comparado ao motor com escovas.
Performance Térmica	Alta	Média/Baixa	Apenas os enrolamentos da armadura geram calor devido a indução eletromagnética, que no motor sem escovas está localizado na periferia do motor (estator), logo consegue dissipar melhor o calor gerado.
Potência de Saída	Alta	Média/Baixa	Ímã permanente com boa qualidade e sem perdas por parte do rotor.
Velocidade / Binário	Constante	Moderadamente Constante	Não existe força de atrito por parte das escovas.
Resposta dinâmica	Rápido	Lento	Os ímãs permanentes levam a que a inércia do rotor seja menor.
Gama de velocidade	Alta	Baixa	O motor com escovas tem uma limitação gerada pelo comutador mecânico.
Longevidade	Longa	Curta	Inexistência de um comutador mecânico.

Tabela 2.1: Comparação entre o motor DC e BDLC [9].

Capítulo 3

Comunicação Sem Fios

Um dos objetivos práticos desta tese de Mestrado é controlar um motor sem escovas através da comunicação sem fios. Para isso, é necessário pesquisar e analisar várias tecnologias sem fios que existem no mercado e, assim escolher uma solução que cumpra todos os requisitos deste projeto.

3.1 *Internet of Things* (IoT)

A IoT é um conceito que está a ganhar notoriedade, no âmbito das telecomunicações sem fios. A tecnologia está evoluir na direção de envolver o menos possível a mão humana, provocando o crescimento de dispositivos eletrónicos ligados entre si numa rede sem fios. Assim, surge uma maior facilidade do acesso à informação, monitorização e controlo à distância [39].

Analistas preveem que cerca de 36 bilhões de dispositivos estarão conectados no ano 2020, seguindo o conceito de IoT (figura 3.1).

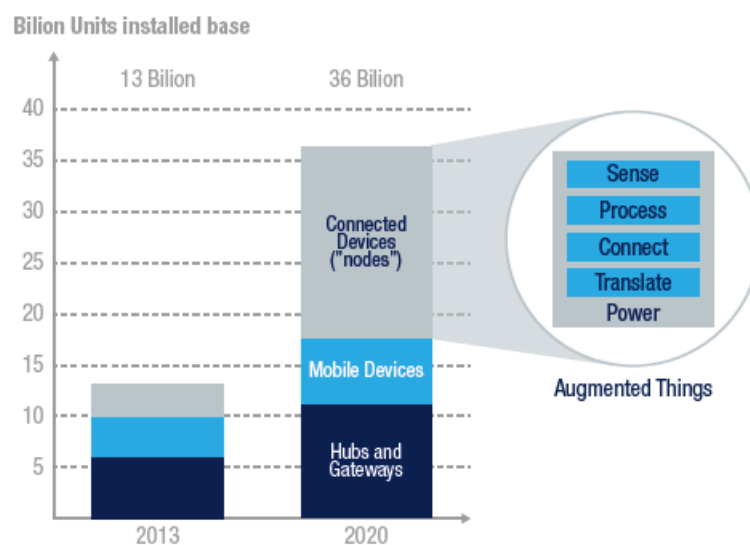


Figura 3.1: Dispositivos conectados em 2020 [10].

Isto tem potenciado o aparecimento de muitas aplicações e sistemas de comunicação sem fios.

3.2 Aplicações IoT

Nos dias de hoje, a intercomunicação e a troca de informação entre dispositivos eletrónicos (sensores e atuadores) desempenha um papel relevante. De seguida, são apresentados alguns exemplos de aplicação:

- **Saúde:** medição dos sinais vitais através do uso de relógios, pulseiras ou telemóveis, o que irá promover um tempo de resposta por parte das unidades de socorro mais curto e eficaz.
- **Tracking:** esta característica pode ser aplicada em pessoas, animais, veículos ou até em objetos pessoais. Desta forma, é possível saber em qualquer instante a localização de uma pessoa, animal ou objeto.
- **Monitorização e administração de uma cidade:** permite a monitorização do consumo de eletricidade, água, lixo, como também o controlo do tráfego automóvel.
- **Agricultura:** monitorização das condições meteorológicas como também o estado do solo. Pode promover uma irrigação inteligente diminuindo os custos e mão de obra.
- **Casas Inteligentes:** o número de casas inteligentes já é significativo nos tempos de hoje. Esta infraestrutura promove o controlo total da mesma através de um telemóvel. Por exemplo, é possível controlar a iluminação, temperatura e até alguns eletrodomésticos.

Todos estes exemplos requerem muitos sistemas de comunicação sem fios.

3.3 Rede de sensores sem fios

A rede de sensores sem fios é uma área que está cada vez mais a ganhar atenção, pois esta abrange uma grande percentagem das aplicações IoT. Esta rede oferece uma forma simples de comunicar entre os nós, como também atuar de acordo com a informação recolhida.

A figura 3.2 ilustra os componentes essenciais de um nó, que é constituído por[40]:

- **Controlador:** tem o propósito de ser o processador do nó, otimizado para sistemas embutidos e com baixo consumo de energia.
- **Fonte de alimentação:** fornece tanta energia quanto possível com menor custo, volume, peso, tempo de recarga e longevidade.
- **Módulo de Comunicação:** responsável pela transmissão e receção de dados ao longo da rede.
- **Memória:** pode ser utilizada para o armazenamento de dados ao longo do tempo ou para programar o dispositivo.
- **Sensores/Atuadores:** estes são capazes de recolher informação do ambiente que estão inseridos ou realizar uma ação física.

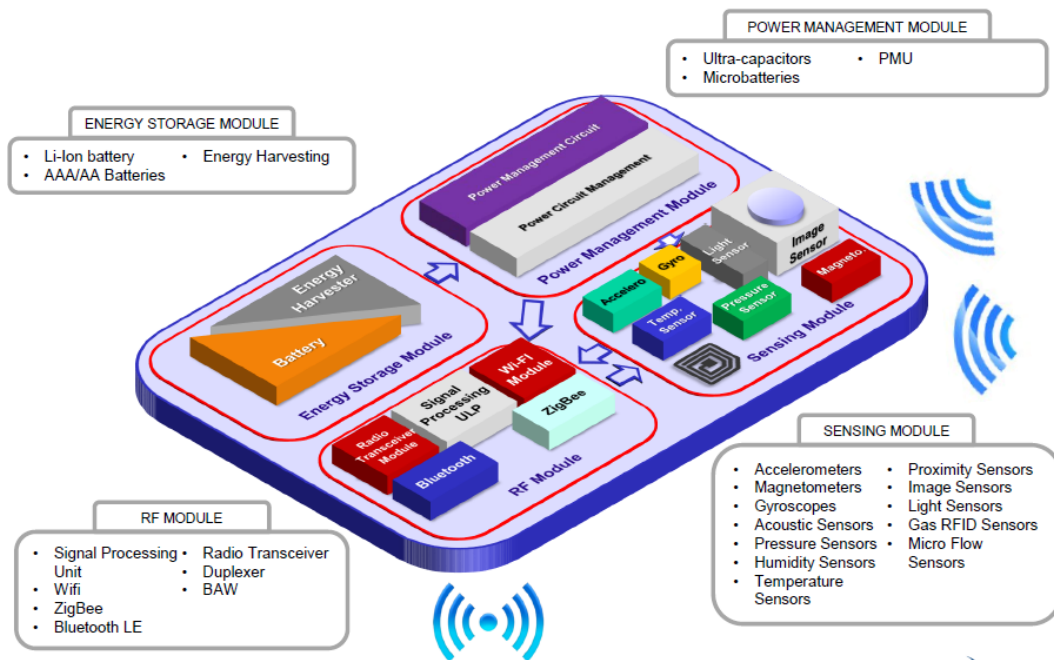


Figura 3.2: Arquitetura de um nó [11].

3.3.1 Stack de uma rede de sensores sem fios

O modelo *Open System Interconnection* (OSI) tem como objetivo definir um padrão comum relativamente aos protocolos de comunicação. Este modelo é tradicionalmente composto por sete camadas bem definidas. No entanto, na área dos sensores sem fios, este modelo apenas apresenta cinco camadas, como é possível visualizar na figura 3.3, pois torna-o menos complexo e mais fácil de ser implementado, sendo mais próximo do protocolo usado na Internet [12].

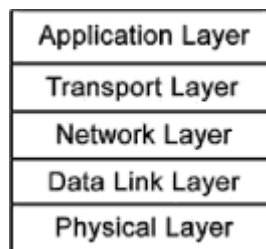


Figura 3.3: Estrutura do modelo simplificado para sensores sem fios [12].

- **Camada física:** é a primeira camada e é responsável por definir e controlar as ligações entre o dispositivo e o meio de comunicação. A seleção da frequência, deteção e modulação de um sinal são características que estão embutidas nesta camada.
- **Data Link:** é responsável por fornecer serviços que permitem que vários nós partilhem ou acessem a informação relativamente ao meio de comunicação. Estes serviços incluem o controlo do acesso ao meio de comunicação, deteção e correção de eventuais erros.
- **Rede:** esta camada está encarregue de estabelecer e coordenar a comunicação entre os

nós na rede, e assim, encaminhar pacotes ao longo da rede de uma forma eficiente e eficaz.

- **Transporte:** esta camada tem a funcionalidade de gerar sessões de troca de informação entre dois nós e assim, assegurar que toda informação chega ao destinatário sem qualquer tipo de erro. Os dois protocolos mais populares são os seguintes:
 - ***Transmission Control Protocol (TCP)*** - é um protocolo que é usado predominantemente na Internet e promove uma comunicação segura, garantindo que os pacotes chegam ao recetor de uma forma ordenada. Existe um *feedback* entre o transmissor e o recetor, visto que ao longo da sessão o nó que está transmitir um ou mais pacotes tem sempre a confirmação do recetor que a informação chegou ou não com sucesso. Caso exista uma falha, de um ou mais pacotes, é necessário reenviar os mesmos até obter uma resposta positiva pelo recetor.
 - ***User Datagram Protocol (UDP)*** - ao contrário do protocolo TCP este protocolo é menos seguro, pois não possui serviços que garantem que os pacotes chegaram com sucesso ao recetor. A garantia dos dados pode ser efetuada pela aplicação em si.
- **Aplicação:** é a última camada que está mais perto do utilizador. Existem vários métodos de a implementar dependendo do objetivo do sistema.

Por outro lado, muitas aplicações de hoje em dia utilizam protocolos proprietários em contraste aos protocolos *standard*. Estes oferecem poucas ou nenhuma camadas, ou seja, a aplicação é realizada através da camada física através de um simples rádio *transceiver*. Estes proporcionam uma maior flexibilidade ao utilizador e são bastante eficientes para projetos de pequena escala [14].

3.3.2 Topologia de rede

É necessário ter em consideração o número de nós que são necessários para uma certa aplicação, e a forma em que estes estão dispostos e ligados entre si. As topologia mais populares são as seguintes:

- **Estrela:** todos os nós devem estar ligados a um nó central que tem função de ser a *gateway*. Por outras palavras, a *gateway* pode ser um computador ou outro sistema embutido, onde toda informação fornecida pelos nós passa pelo nó central, que é responsável pela coordenação da comunicação entre eles. Por outro lado, este nó central também é capaz de ligar a outras redes como a Internet.

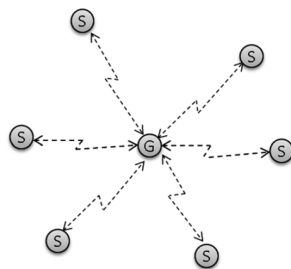


Figura 3.4: Topologia Estrela [13].

- **Mesh:** Esta arquitetura significa que um dos nós pode estar ligado a diferentes nós que estejam dentro do seu alcance, onde um deles é a *gateway*. É necessário ter um protocolo de *routing* que ofereça o melhor caminho para troca de informação entre os sensores e a *gateway*. Logo, é necessário que os nós estejam sempre ligados, pois estes são essenciais para que a comunicação seja feita com sucesso ao longo da rede.

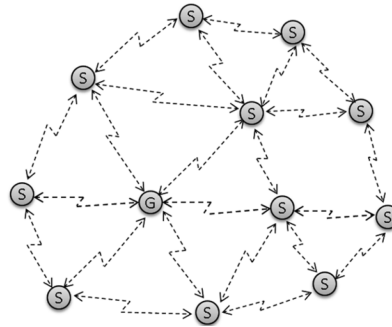


Figura 3.5: Tipologia *mesh* [13].

- **Árvore:** esta topologia é constituída por vários níveis hierárquicos. No nível mais elevado tem um nó central, que normalmente é a *gateway*. Os níveis mais abaixo são ramificações que ajudam a prolongar o alcance da rede. No entanto, as operações e transmissão de dados têm de ser devidamente agendadas, ou seja, todos os nós têm de estar sincronizados.

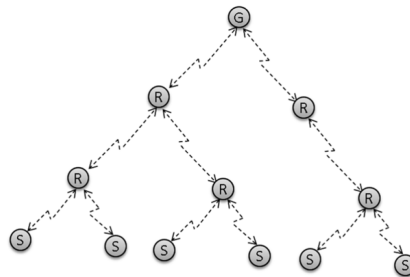


Figura 3.6: Tipologia árvore [13].

3.4 Módulo de comunicação

Como foi mencionado anteriormente, o crescimento de inúmeras aplicações leva à constante inovação e a criação de novas metodologias de comunicação sem fios, por parte do mercado e das empresas. Neste momento, no mercado existem muitas variedades de módulos de comunicação sem fios com diversas características. Portanto, é necessário ter algumas noções antes da escolha do módulo de comunicação.

3.4.1 Consumo de energia

A fonte de energia tem um papel importante, e é necessário que esta seja capaz de fornecer energia suficiente para que o módulo de comunicação funcione corretamente. De modo a

rentabilizar de forma eficiente a fonte de alimentação, existem várias configurações que podem ser implementadas no módulo.

- Baixar os níveis de potência da transmissão de dados.
- Baixar a sensibilidade do recetor.
- Utilizar sempre que possível estados do módulo que utilizem baixo consumo de energia, como por exemplo o *sleep-mode*.

Obviamente, que estas configurações têm um impacto drástico relativamente ao alcance.

3.4.2 Frequência

As transmissões rádio são reguladas por organizações, como por exemplo, nos Estados Unidos existe a organização FCC (*Federal Communications Commission*), e na Europa o CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*). Estas organizações tentam organizar e distribuir frequências para determinados usos e aplicações. A maior parte do espectro usado é licenciado, ou seja, o utilizador necessita de comprar uma licença à organização reguladora do país, para que lhe seja concedido a transmissão de ondas de rádio em determinada frequência [14]. A ITU-R (*International Telecommunication Radio Communication*) é responsável por algumas frequências do espectro que podem ser usadas globalmente. As bandas mais populares estão posicionadas no espectro nas frequências de 433 Mhz, 868 Mhz, 915 Mhz e 2.4 GHz. Estas frequências não são licenciadas e estão exclusivamente reservadas para aplicações ISM(*Industrial, Scientific and Medical*). A frequência 2.4 GHz pode ser utilizada em qualquer ponto do planeta, no entanto as restantes dependem da região, tal como se pode verificar na figura 3.7 [14].

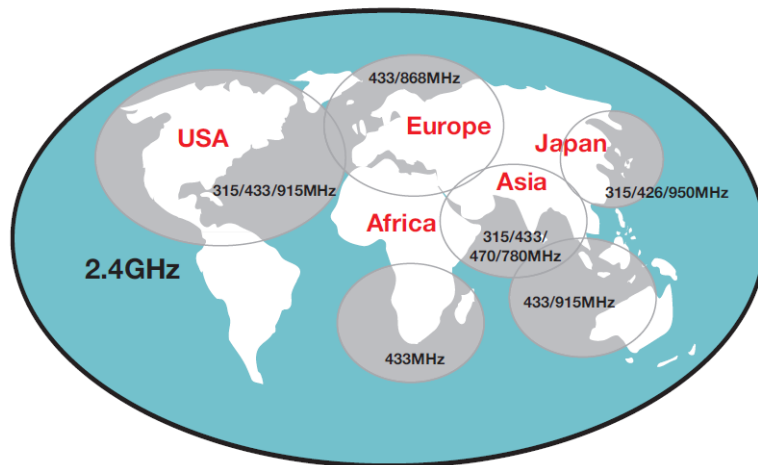


Figura 3.7: Frequências não licenciadas a nível Mundial.[14]

Regra geral, a frequência 2.4 GHz oferece mais canais e maior largura de banda logo, possui a vantagem de ser utilizada em redes de grandes dimensões e com maior taxa de transferência de dados. Por outro lado, as frequência mais baixas (433, 868 e 915 MHz) conseguem ter um maior alcance. Os módulos de comunicação que operam dentro desta gama de frequências são denominados como módulos sub-GHz.

Portanto, é necessário ter em atenção a frequência do módulo, consoante os requerimentos do sistema a implementar. A figura abaixo, representa as várias aplicações divididas em duas classes. A classe 2.4 GHz, apresenta aplicações que têm um alcance curto, ou precisam de uma taxa de transmissão de dados elevada, para isto estão identificadas nos retângulos verdes três tecnologias populares que são utilizadas em diversas aplicações, como por exemplo, periféricos, comandos e *smart watches*. A classe sub-GHz apresenta aplicações, como RKE (*Remote keyless Entry*), GDO (*Garage Door Opening*), TPMS (*Tire Pressure Monitoring Systems*) e drones, em que o alcance da comunicação é bastante importante [15].

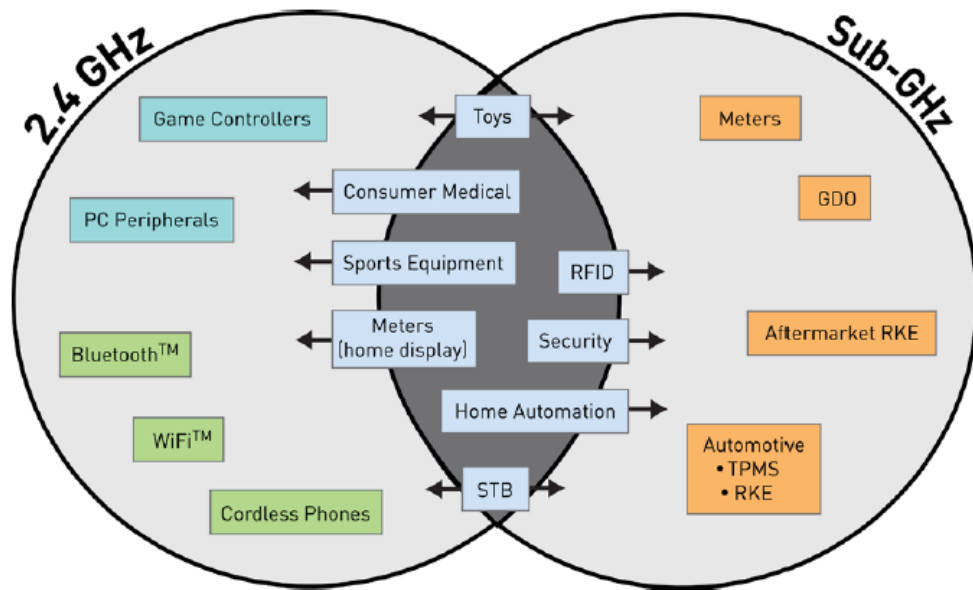


Figura 3.8: Algumas aplicações que existem e a frequência que é utilizada[15].

3.4.3 Ambiente da aplicação

É necessário ter cuidado com o local onde irá ser implementado o módulo de comunicação sem fios. As condições térmicas e o ruído do meio a que o módulo está submetido, pode dar a origem a um mau desempenho do mesmo.

3.4.4 Alcance

O alcance está diretamente relacionado com a potência de transmissão e com a sensibilidade do recetor. Através da equação de Friis[20], é possível calcular a relação entre a potência do sinal transmitido com a potência do mesmo à chegada nos terminais do recetor. No entanto esta fórmula (3.1), só pode ser aplicada quando não existe qualquer tipo de obstáculos durante a propagação do sinal (o que não será o nosso caso).

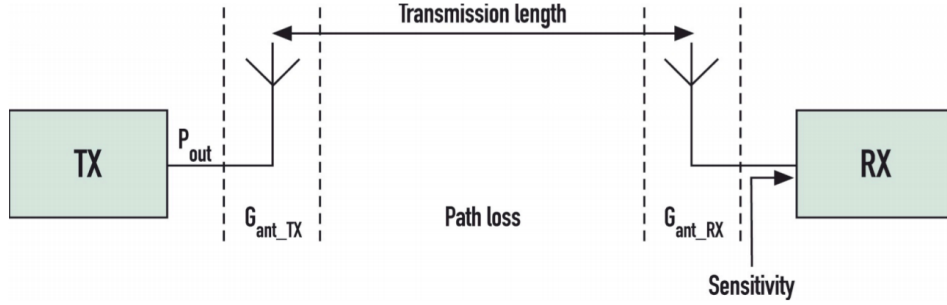


Figura 3.9: Ilustração dos parâmetros acerca do alcance entre o transmissor e um recetor[16].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_r}} \quad (3.1)$$

- P_t - Potência de transmissão.
- P_r - Potência recebida pelo recetor.
- G_t - Ganho da antena por parte do transmissor.
- G_r - Ganho da antena por parte do recetor.
- λ - Comprimento de onda.

O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, tal como indica a próxima expressão matemática:

$$\lambda = c/f \quad (3.2)$$

Através da expressão 3.1, observa-se que a potência que chega aos terminais da antena do recetor é inversamente proporcional ao quadrado da distância. Logo, é necessário ter em atenção a potência máxima de transmissão como também a sensibilidade. Obviamente, que estes parâmetros têm uma influência direta com a energia consumida, como foi retratado no tópico anterior.

A sensibilidade é a potência mínima que pode chegar aos terminais da antena do recetor. Esta oferece a garantia que a comunicação seja efetuada com sucesso ao longo do tempo. Normalmente, esta taxa de sucesso está identificada nas variáveis BER (*Bit Error Rate*) e PER (*Packet Error Rate*). A primeira variável traduz que em 1000 bits transferidos haja apenas um bit que pode estar errado, e a segunda variável segue a mesma linha de pensamento da anterior, porém é aplicada a pacotes transferidos em vez de bits.

A diferença entre a potência do sinal recebido e o limite da sensibilidade do recetor é designada *headroom* ou espaço livre (figura 3.3). Este parâmetro depende da distância do transmissor, frequência do módulo e dos obstáculos que o sinal pode encontrar durante a sua trajetória [16].

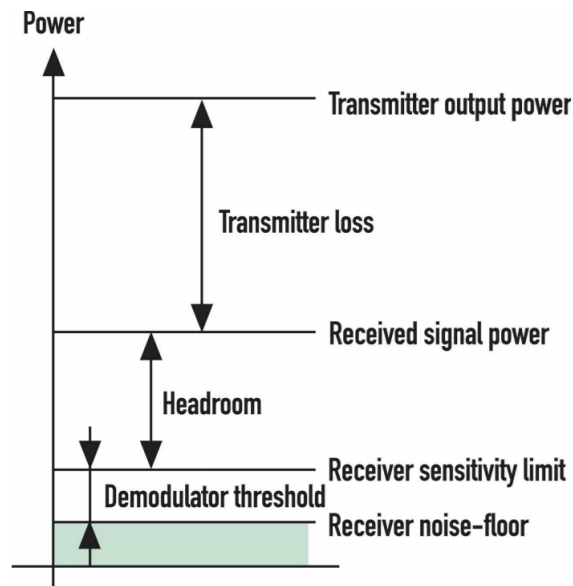


Figura 3.10: Demonstração da degradação da potência do sinal transmitido até chegar ao recetor[16].

As antenas do transmissor transmitem ondas eletromagnéticas para o meio, que posteriormente serão captadas pela antena do recetor, que converte esta onda eletromagnética em sinais digitais. O uso de antenas tem o papel fundamental de aumentar o alcance, pois conseguem amplificar a potência do sinal, como é possível verificar na expressão 3.1. Existem três tipos de antenas que diferem na maneira como radiam a potência do sinal para o espaço[41]:

- **Isotrópica:** radiam com a mesma potência em todas as direções do espaço.
- **Direcionais:** têm a propriedade de captar ou radiar ondas eletromagnéticas preferencialmente para certas direções do espaço.
- **Omni-direcional:** não radiam para um determinado plano do espaço.

A onda eletromagnética pode enfrentar vários obstáculos durante a sua propagação, que dão origem aos seguintes fenómenos físicos:

- Reflexão
- Refração
- Difração
- Absorção
- Dispersão

A ocorrência destes fenómenos provoca um enfraquecimento da potência do sinal que chega aos terminais da antena do recetor, pelo que diminui drasticamente o alcance entre o transmissor e o recetor. A figura 3.11, demonstra a potência perdida de uma onda eletromagnética após encontrar certos tipos de materiais.

Object causing path loss	Typical loss [dB]
Wall (indoor)	10-15
Wall (exterior)	2-38 (percentage of windows and height important)
Floor	12-27
Window	2-30 (metal tinted windows cause high loss)

Figura 3.11: Absorção de energia em determinados obstáculos [16].

Por outro lado, através da ilustração 3.12, observa-se que a onda ao encontrar um obstáculo, pode dar origem a múltiplas ondas que contêm a mesma informação, no entanto, estas chegam ao recetor com diferentes fases. Durante o processo de descodificação por parte do recetor, o aparecimento de ondas desfasadas pode ter um papel construtivo, amplificando o sinal, ou destrutivo, atenuando o sinal, o que pode potenciar a origem de erros na trama de um pacote. Para combater este problema, vários módulos de comunicação possuem um campo que verifica a integridade da informação fornecida.

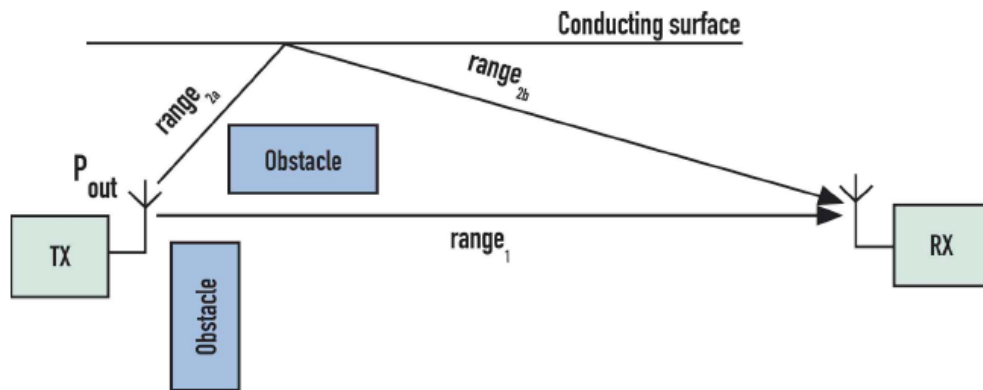


Figura 3.12: Multipathing.[16]

O estudo das Zonas de Fresnel pode ser bastante vantajoso em várias aplicações. Através da figura 3.13, são definidas uma série de elipses concêntricas, onde são delineadas as várias zonas de Fresnel. Estas podem ser calculadas tendo como base a figura 3.14, pela a seguinte expressão matemática:

$$F_n = \sqrt{\frac{nd_1d_2\lambda}{d_1 + d_2}} \quad (3.3)$$

- F_n - Raio da enésima Zona de Fresnel.
- d_1 - Distância do ponto P para uma das antenas.
- d_2 - Distância do ponto P para a outra antena.
- λ - Comprimento de onda.

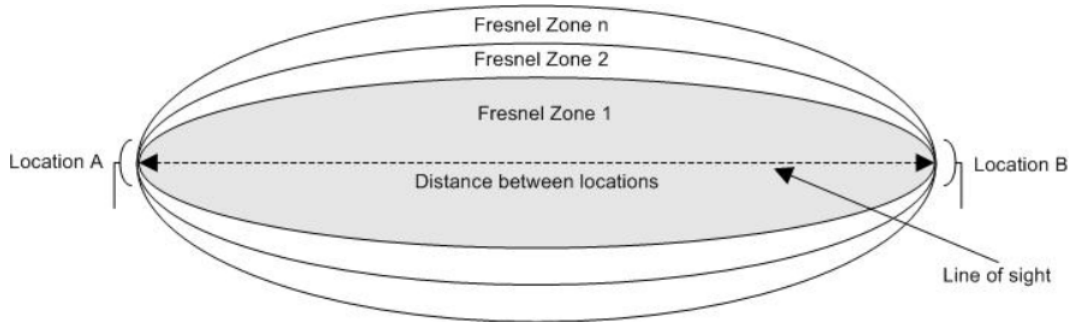


Figura 3.13: Zonas de Fresnel[17].

Na prática, é vantajoso saber o raio máximo da primeira zona de Fresnel. Este raio pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$h = 8.657 \sqrt{\frac{R}{f}} \quad (3.4)$$

- h - Raio máximo da elipse da primeira zona de Fernel.
- R - Distância entre o transmissor e o recetor ($R = d_1 + d_2$).
- f - Frequência da onda.

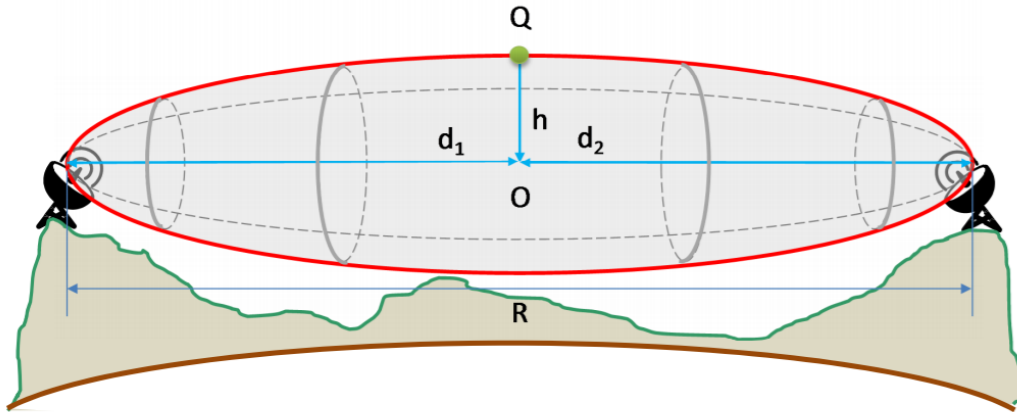


Figura 3.14: Cálculo da Zona de Fresnel [18].

As zonas de Fernel, indicam ao utilizador o papel que a fase das ondas pode ter na chegada ao recetor, através da posição onde se encontra o obstáculo. A diferença de fase de uma onda refletida é dada pela seguinte fórmula:

$$(q - 1)\pi \leq \Delta\phi \leq q\pi \quad (3.5)$$

Onde q corresponde a uma determinada zona de Fresnel. Se existir uma reflexão tangente à primeira zona de Fernel, esta irá chegar ao recetor desfasada de 180° , o que irá provocar um

cancelamento do sinal. Por outro lado, se a reflexão for tangente à segunda zona de Fresnel, esta irá amplificar o sinal nos terminais da antena facilitando o trabalho do recetor. As fases ímpares têm um papel destrutivo e as fases pares tem um carácter construtivo[42].

Manter a primeira zona de Fresnel livre de obstáculos, garante ao utilizador uma propagação em espaço livre, pois grande parte da energia do sinal está contida nesta zona. Por vezes, alterar a localização das antenas pode ser benéfico, de modo a evitar qualquer tipo de obstáculo na primeira zona de Fresnel. Para obter a melhor eficiência da comunicação entre dois módulos de comunicação sem fios, segue-se a regra que 60% da primeira zona de Fresnel deve estar livre de qualquer obstáculo [42].

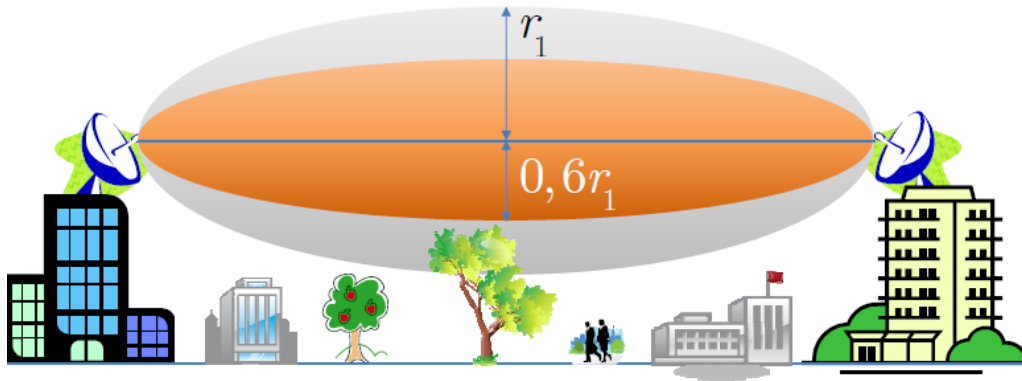


Figura 3.15: Comunicação eficiente na primeira zona de Fresnel [18].

Outro tipo de interferências, podem ser causadas quando um ou ambos os módulos de comunicação se encontram em movimento, o que dará origem ao efeito Doppler. A ilustração 3.10 exemplifica uma situação real, em que a mudança da frequência pode ser dada pela seguinte expressão:

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} \cos(\theta)$$

- f_d - frequência de Doppler.
- f_0 - Frequência da banda base.
- v - Velocidade do módulo relativamente ao módulo estático.
- c - Velocidade da luz.
- θ - Ângulo produzido entre os dois módulos.

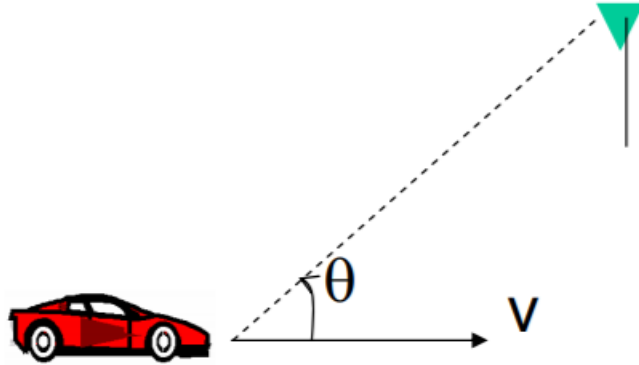


Figura 3.16: Exemplo do efeito Doppler [19].

A frequência recebida pelo módulo estático irá ter componentes $f_c + f_d$ ou $f_c - f_d$, onde f_c é a frequência do sinal transmitido. A frequência da onda aumenta à medida que os dois módulos se aproximam, e em contrapartida a frequência da onda diminui se os dois módulos se afastarem. Para minimizar este efeito, aumenta-se a largura de banda de forma a que as variações de frequência sejam insignificantes.

3.4.5 Taxa de transmissão

A taxa de transmissão pode ser importante em algumas aplicações. O alcance varia com esta taxa, quanto maior esta for menor será alcance. A figura abaixo relaciona a taxa de transmissão com o alcance máximo de um módulo RF.

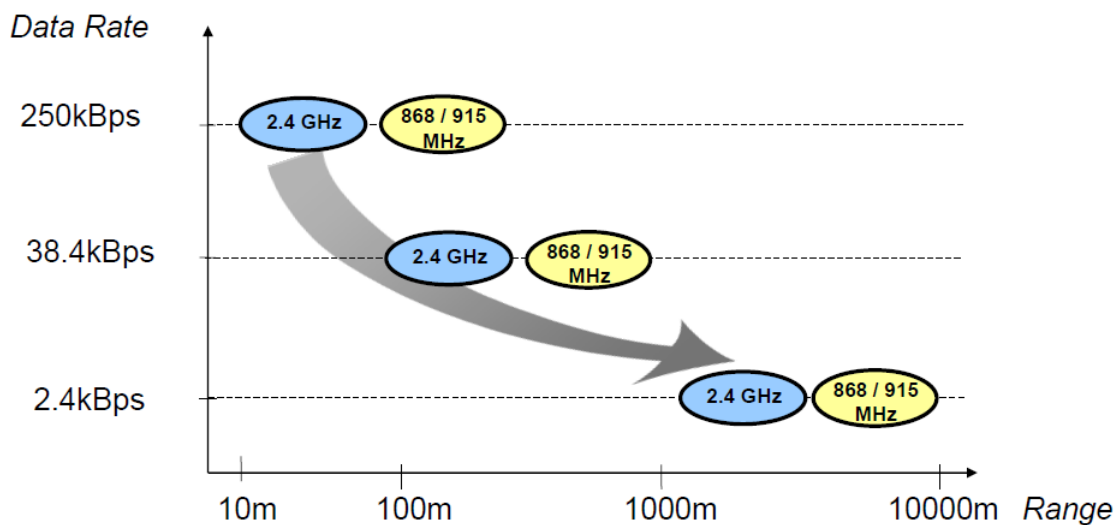


Figura 3.17: Alcance de acordo com a data rate do módulo de comunicação [20].

3.4.6 Modos de transmissão

Existem vários tipos de modos de transmissão que são implementados nos módulos de comunicação, tais como:

- **Simplex:** a comunicação entre os nós é unidirecional.
- **Half-duplex:** a transmissão é efetuada de forma bidirecional porém, é executada alternadamente em cada sentido(figura 3.11).

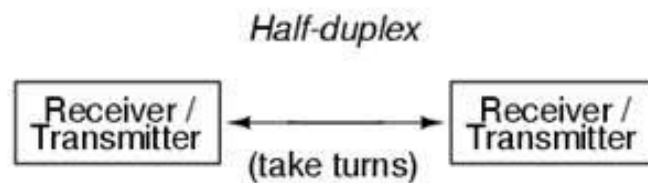


Figura 3.18: *Half-duplex* [21].

- **Duplex:** a comunicação é bidirecional e simultânea(figura 3.12).

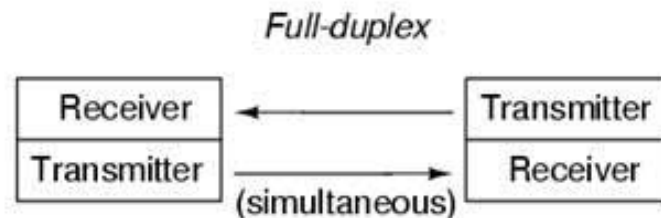


Figura 3.19: *Full-duplex* [21].

É necessário ter em atenção estes diferentes tipos de modos, de forma à comunicação cumprir todos os requerimentos da aplicação. Tipicamente usamos comunicação *half-duplex*.

3.4.7 Comparação entre tecnologias de comunicação sem fios

Como já foi referido, existem muitas tecnologias sem fios no mercado. A próxima tabela demonstra os módulos mais populares que são usados em muitas aplicações IoT e as suas características.

Wireless Technologies										
Technical capabilities	LoraWan	NWave	SigFox	Cellular	RF Transceiver	BLE	WiFi	ZigBee	Z-Wave	
Range(km/m)	2-5 urban; 15 suburban; 45 km rural	Up to 10km	Up to 10 km urban; 50 km rural	35km GSM: 200km 3G/4G	Depends	80m	50m	100m/ Mesh	30m/Mesh	
Deep Indoor Performance	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	No	-	-	
Freq. Band	Varies, Sub-GHz	Sub-GHz	Frequency Independent; 868/902 MHz	900/1800 /1900/2100 MHz	433, 868, 915 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	915 MHz, 2.4 GHz	900 MHz	
ISM?	Yes	Yes	Yes	Depends	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
Fully Bi-Directional	Yes, depends on mode	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
Data Rate	0.3 – 50 kbps adaptive	100 bps	10 – 1000 bps	35-170 kbps GSM/3;	-	< 1 mbps	600 mbps Max	250 kbps	10-100 Kbps	
Power Profile	Low	Low	Low	Medium	Low	High	High	Low	Low	
Authentication	Yes	Yes	Yes	High security, Back by major Telecoms	-	Trusted Devices	Yes	Yes	Yes	
E2E Encryption	Yes	Yes	Yes	Yes	-	Problematic	Yes	Yes	Yes	
Over the Air Software Upgrades	Yes	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
Support sensors moving between hubs	Yes	No	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes, mesh based	Yes, mesh based	
Location Aware	Yes	No	No	Yes	No	No	Yes	-	-	
Standard	Lora	Weightless	No	<u>GSM, LTE, etc</u>	No	Bluetooth 4.0	IEEE 802.11	Zigbee	Z-Wave	
Scalability	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes, but low	Yes		Yes	Limited	

Figura 3.20: Características de vários módulos IoT [22].

LoRaWAN

A tecnologia LoRaWan está inserida na categoria LPWAN (*Low Power, Wide Area Network*). Esta foi concebida para ligar uma grande variedade de aplicações à internet em redes regionais, nacionais ou globais sem fios. A arquitetura da rede LoRaWAN possui a topologia de várias estrelas que estão ligadas entre si, onde cada *gateway* tem a função de ser um elo de ligação entre os *end-devices* e servidor central da rede. As *gateways* estão conectadas com o servidor por meio de conexões IP padrão, que efetuam a conversão de pacotes RF para pacotes IP e vice-versa. Cada *end-device* pode comunicar com várias *gateways* através da camada física LoRa, que significa longo alcance (*Long Range*) [43].

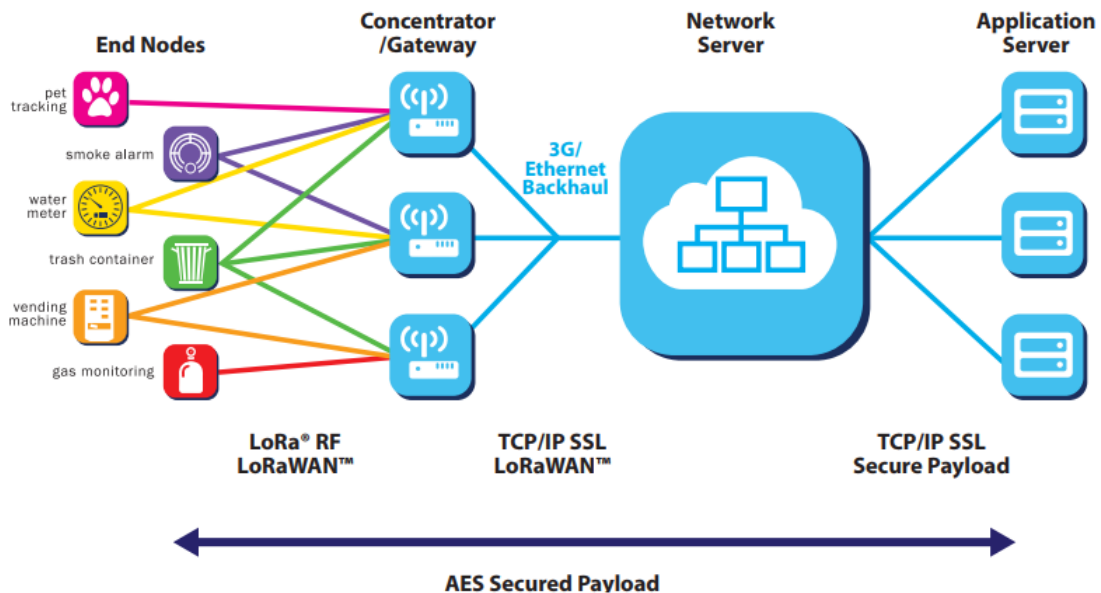


Figura 3.21: Estrutura de uma rede LoRaWAN [23].

NWave

A NWave utiliza a tecnologia UNB (*Ultra Narrow Band*), ou seja, a largura de banda é pequena, o que é particularmente adequado para o tráfego de poucos dados. Esta característica torna-a uma boa solução para as comunicações LPWAN[44]. Esta companhia oferece módulos rádio, modems e estações bases para os utilizadores criarem a sua própria rede [45]. A empresa está associada ao *standart weightless-N*, que utilizam frequências sub-GHz.

Os projetos desta empresa estão mais direcionados para o controlo das cidades, sendo esta área uma ramificação do conceito IoT denominado como *smartcitys*. A próxima figura demonstra um sistema implementado por parte desta empresa. Este consiste em informar ao utilizador posições vagas para colocar o seu veículo. Todos os parques de estacionamento possuem sensores que enviam para a estação base a sua disponibilidade, que de seguida é atualizada para uma aplicação *back-end*.



Figura 3.22: Sistema de localização de posições vagas para colocar o veículo [24].

SigFox

A companhia SigFox pretende ser um operador global para aplicações IoT. Esta utiliza uma modulação UNB (*Ultra Narrow Band*), ocupando 192 KHz do espectro público disponível para realizar comunicações sem fios. Na Europa, esta tecnologia está alocada entre os 868 MHz e os 868.2 MHz.

Existem várias estações base espalhadas no globo, que permitem a comunicação bi-direcional com qualquer dispositivo que esteja relativamente perto, e enviar informação para a *cloud*. Cada dispositivo é capaz de enviar 140 mensagens por dia com um tamanho de 12 bytes.

A cobertura ainda está em fase de desenvolvimento, contudo este tipo de rede pode ser incorporado em Portugal.

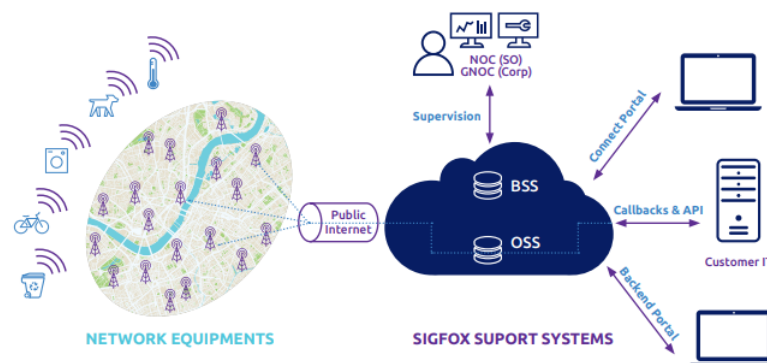


Figura 3.23: Arquitetura da rede SigFox [25].

Cellular

A tecnologia Cellular está associada a uma rede telefónica, que já existe há muito tempo, comparando com outras tecnologias. O crescimento de dispositivos levou ao desenvolvimento desta área, com as tecnologias 2G,3G,4G e 5G, sendo que esta última ainda está em fase de

desenvolvimento. Hoje, é possível utilizar esta rede para efetuar chamadas de voz e envio de dados de uma forma segura e de confiança [46].

Estas tecnologias podem ser encontradas nos nossos *smartphones* porém, consomem muita energia e não se encaixam bem em aplicações onde só é necessário enviar pacotes de pequena dimensão. Portanto, a Cellular IoT criou sistemas que conseguem realizar comunicações a longas distâncias e com um consumo de energia reduzido.

Radio Transceiver

Existe um enormíssimo leque de aplicações que usam protocolos proprietários através de *radio transceivers*. Estes apenas conseguem fornecer a camada *link*, ou apenas a camada física da rede. Assim, existe uma maior flexibilidade da arquitetura da rede por parte do utilizador.

Estes sistemas de rádio utilizam as frequências ISM (433,868,915 MHz), e são bastante utilizados em topologias simples, como a ponto-a-ponto ou em estrela.

De acordo com o conceito IoT, esta tecnologia necessita de implementar uma ponte de ligação com a Internet. Normalmente, é introduzido um computador à rede, que tem a função de *gateway*. [14]

Bluetooth e BLE

A tecnologia *Bluetooth* está localizada no espectro à frequência ISM 2.4 GHz, e é utilizada em topologias ponto-a-ponto e em estrela. Esta tornou-se bastante popular em telemóveis, para a ligação de acessórios como auriculares sem fios, *streaming* de música, *smart watches*, entre outros. Comparado aos outros sistemas já descritos, estes consomem mais energia e têm menor alcance, porém, as velocidades de transmissão são mais elevadas. A tecnologia BLE (*Bluetooth Low Energy*), diminui a velocidade de transmissão de dados para diminuir o consumo de energia, e aumenta o alcance.

Este mecanismo tem interoperabilidade com dispositivos como portáteis, *smartphones* e *tablets*, que podem funcionar como Internet *gateways* [14].

Wi-Fi

Wi-Fi é a rede sem fios mais popular, pois existe em maior parte das casas, escolas, cafés, etc. Esta está estruturada numa topologia em estrela, onde a *gateway* para a Internet é facilitada por um AP (*Access Point*). O alcance por vezes não é suficiente para cobrir a totalidade de uma infraestrutura, logo, para estender esta rede, é necessário colocar vários AP, até que a cobertura seja ideal.

Esta pode funcionar na frequência 2.4 GHz ou 5 GHz, para conseguir transmitir dados a altas velocidade, porém, têm um consumo energético bastante elevado.

Uma vez que as aplicações IoT não necessitam de velocidades tão elevadas, o controlo de energia é efetuado fornecendo vários *bursts* de corrente em pequenos intervalos [14].

ZigBee

A rede ZigBee é baseada no standard IEEE 802.15.4, com baixas velocidades de transmissão, baixo consumo e baixo custo. Este possui módulos de comunicação que funcionam principalmente na frequência 2.4 GHz, 868 MHz e 915 MHz e possui um micro processador que tem armazenado o *firmware* ZigBee. Este é bastante utilizado em automação, controlo de

luzes e *smart energy*. Para esta tecnologia estar associada ao conceito IoT, requer que um nó da rede seja a *gateway*, que para além de efetuar a sua função na rede, envia e recebe pacotes TCP/IP através de um cabo Ethernet ou por Wi-Fi [14].

Z-Wave

Esta tecnologia Z-Wave utiliza uma topologia *mesh* com uma comunicação bi-direcional e utiliza uma frequência 908.42 MHz nos Estados Unidos e 868.42 MHz na Europa para não interferir com outras tecnologias. Esta é principalmente utilizada em casas inteligentes, onde são espalhados vários módulos rádio de forma a ter a cobertura total da casa e assim, facilitar certas tarefas como luzes, portas, temperatura ao utilizador. Um dos nós da rede possui a função de *gateway* para uma aplicação via Internet, que envia para a rede Z-Wave as tarefas que necessitam de ser realizadas, ou recebe o estado atual de um sistema [47].



Figura 3.24: Exemplo de aplicação Z-Wave [26].

Capítulo 4

GNSS

A sigla GNSS significa *Global Navigation Satellite System*, que engloba todos os sistemas de posicionamento que são constituídos por constelações de satélites que orbitam o nosso planeta Terra. Estes são capazes de produzir sinais com vários dados para os recetores GNSS calcularem a sua própria posição.

4.1 Arquitetura de um sistema GNSS

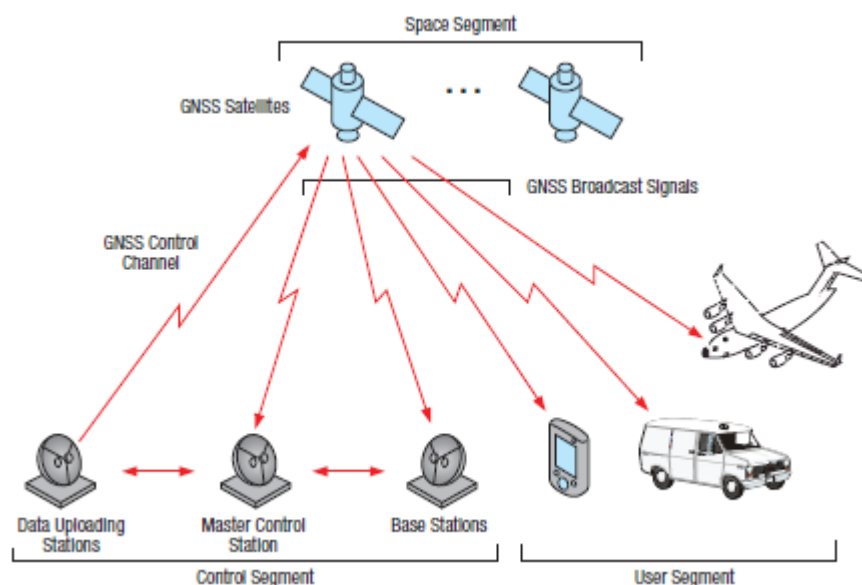


Figura 4.1: Segmentos de um sistema GNSS [27].

Um sistema GNSS é composto por três segmentos:

- **Segmento Espacial:** consiste num grupo de satélites artificiais que orbitam em torno do nosso planeta. Cada sistema GNSS tem a sua própria constelação a uma certa altitude e com uma topologia bem definida. Estes têm a função de enviar sinais que contêm informação acerca do tempo, estado e órbita.

- **Segmento de Controle:** existe uma rede terrestre de estações implementadas em vários locais do planeta. Por exemplo, para o sistema Norte-Americano GPS, cada estação tem o seu propósito, como se pode ver pela figura 4.2. Existe uma rede de estações de monitorização espalhadas globalmente de modo adquirir informação proveniente de todos os satélites que pertencem à constelação GPS. Esta informação será posteriormente enviada e analisada por estações Mestres, o que possibilita a manutenção da integridade da constelação através de comandos que são enviados das estações que possuem antenas apropriadas, que possibilitam o *upload* de dados.

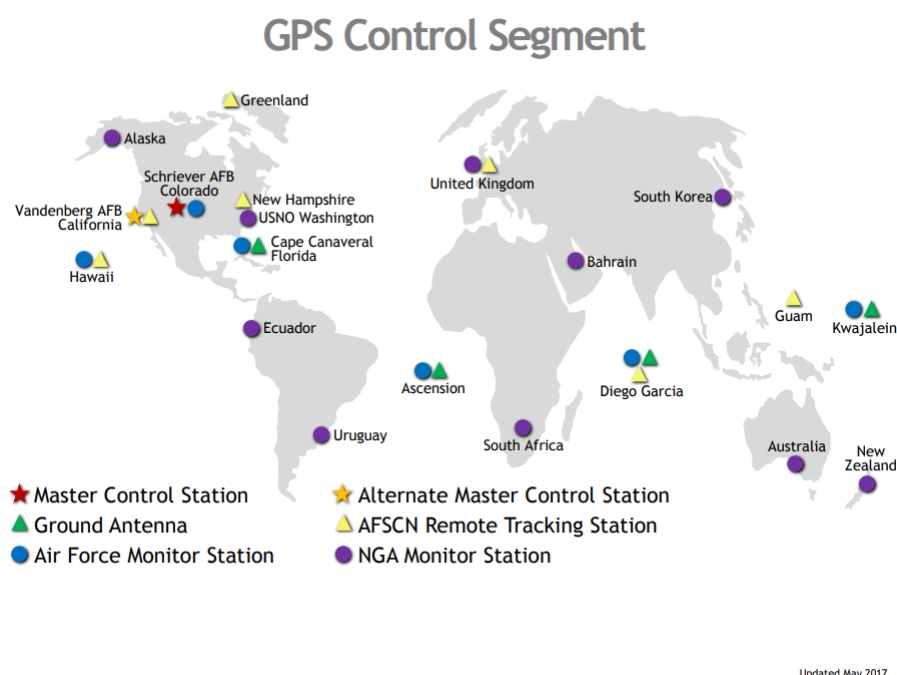


Figura 4.2: Rede de controlo do sistema GPS [28].

- **Segmento do Utilizador:** consiste em aparelhos capazes de detetar e decifrar as mensagens que são enviadas pelos satélites GNSS e assim, transmitir ao utilizador a informação da sua posição juntamente com o tempo atual.

Existem muitas áreas onde esta tecnologia tem um papel predominante, tais como:

- **Aviação:** o piloto tem a informação da posição do avião em tempo real. Também permite que os operadores consigam escolher antes do voo a rota mais segura e adequada.
- **Agricultura:** o tópico mais comum são os veículos autónomos, como por exemplo um trator, que é capaz de cumprir a sua função ao longo do terreno através da monitorização da sua posição em tempo real. O agricultor apenas tem de delimitar o espaço de atuação deste.
- **Ciência:** uma das aplicações mais conhecidas é a informação em tempo real da posição, velocidade e direção através de um dispositivo GNSS que poderá estar ligado a um animal/objeto.

- **Desporto:** Ao associar esta tecnologia a um atleta é possível saber em tempo real a posição, distância percorrida, velocidade entre outros parâmetros.

4.2 Sistemas GNSS

Atualmente já existem vários sistemas GNSS espalhados pelo mundo. Os projetos de maior importância são apresentados seguidamente:

- **GPS (*Global Position System*):** é o sistema mais popular dos sistemas GNSS. Os primeiros satélites GPS foram lançados no final dos anos 70, pelo departamento de Defesa dos Estados Unidos da América. Desde então, a frota deste sistema passou por várias gerações, denominadas *blocks*. Neste exato momento, a constelação é constituída por uma mistura de satélites de diferentes gerações.

A constelação está distribuída por 6 planos orbitais, igualmente espaçados a uma altura de 20200 km. Cada plano possui 4 espaços que são ocupados por 4 satélites. Este arranjo de 24 satélites garante que o utilizador consiga utilizar pelo menos 4 em qualquer ponto do planeta. Existem ainda satélites suplentes, que têm a função de melhorar o desempenho da constelação e substituir um elemento da constelação quando necessário.

A última atualização foi realizada no dia 24 de Março de 2018, onde ocorreu uma expansão da constelação para 31 satélites, sem contar com os satélites que foram desmantelados ou com a função de suplentes [48].

- **GLONASS:** é o sistema de navegação por satélites russo. Os primeiros satélites foram lançados no ano de 1982, porém a constelação de 24 satélites de primeira geração só foi concluída no ano 1995. Antes de entrar no século XXI, surgiu uma crise económica que influenciou o desenvolvimento desta constelação, pois no ano de 2002 esta apenas consistia em 7 satélites, o que era insuficiente para fins de navegação e de suporte ao longo do território Russo. Nesse mesmo ano, o governo russo resolveu implementar um programa federal para reconstrução e melhoramento do sistema.

Atualmente, o sistema já contém novamente os 24 satélites espalhados em 3 planos orbitais, a uma altura de 19100 km. o que resulta num período orbital de 11 horas e 15 minutos [49].

- **GALILEO:** ao contrário dos outros dois sistemas já descritos, este sistema Europeu é bastante recente, pois apenas lançou os seus primeiros satélites operacionais em 2011. A constelação ainda não está completa porém, espera-se que até ao ano 2020 esta seja composta por 30 satélites, espalhados por 3 planos orbitais, a uma altitude de 23222 km e com um período orbital de 14 horas [50]. O último lançamento foi realizado no dia 25 julho de 2018, que resultou numa expansão da frota para 26 satélites[51].
- **Beidou:** este é o sistema de navegação global desenvolvido por parte da China. Tal como o sistema Europeu, este ainda está em fase de crescimento e atualmente já possui 15 satélites operacionais. O objetivo final é criar uma constelação híbrida de 35 satélites, onde 27 irão estar na órbita MEO, a 21500 km de altura e os restantes irão estar presentes na órbita GEO, a uma altura de 35786 km [52].

4.2.1 Sinais GNSS

Cada um dos sistemas possui vários tipos de sinais em várias frequências, como se pode verificar na figura 4.3. Cada sinal tem as suas propriedades e são utilizados para serviços específicos, mas apenas alguns se encontram disponíveis para o utilizador.

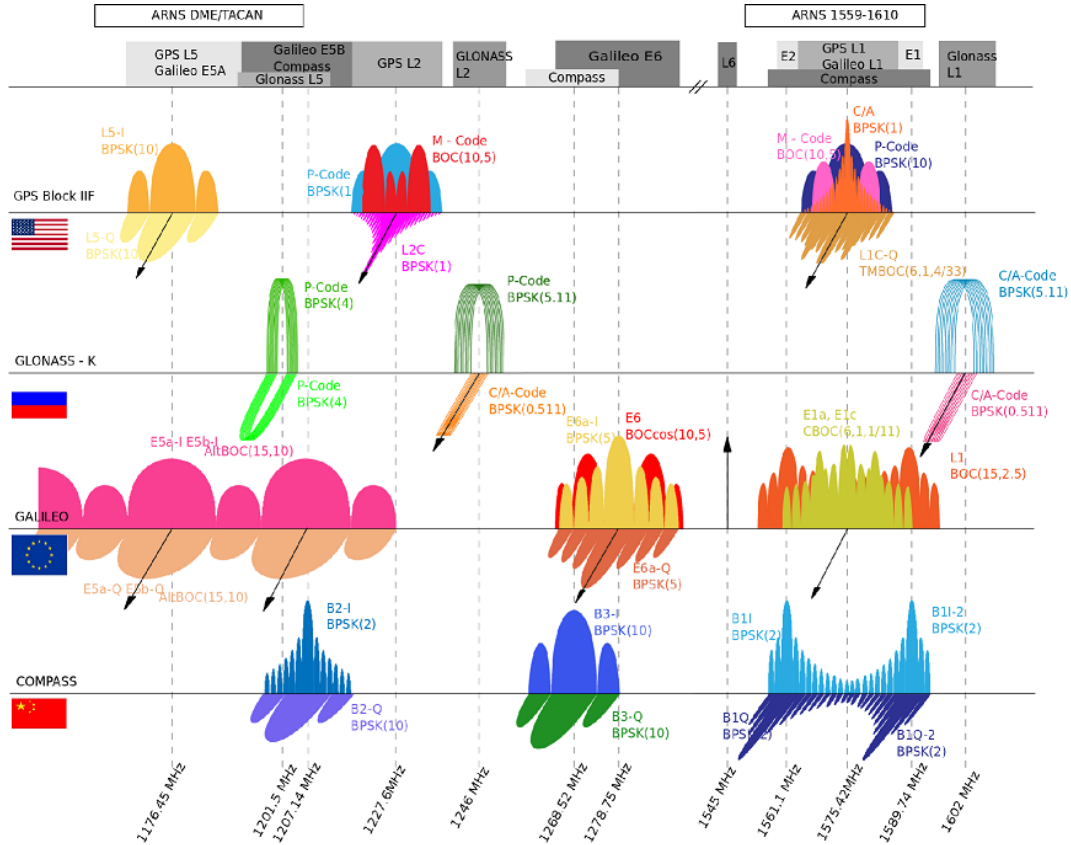


Figura 4.3: Espectro dos sinais GNSS [29].

4.3 Determinação da posição

O recetor, após receber o sinal transmitido pelo satélite, é capaz de calcular o tempo de propagação do sinal. Este processo está exemplificado na imagem 4.4. Estes equipamentos conhecem todos os códigos pseudo-aleatórios de cada satélite da constelação, o que torna possível calcular o tempo de propagação.

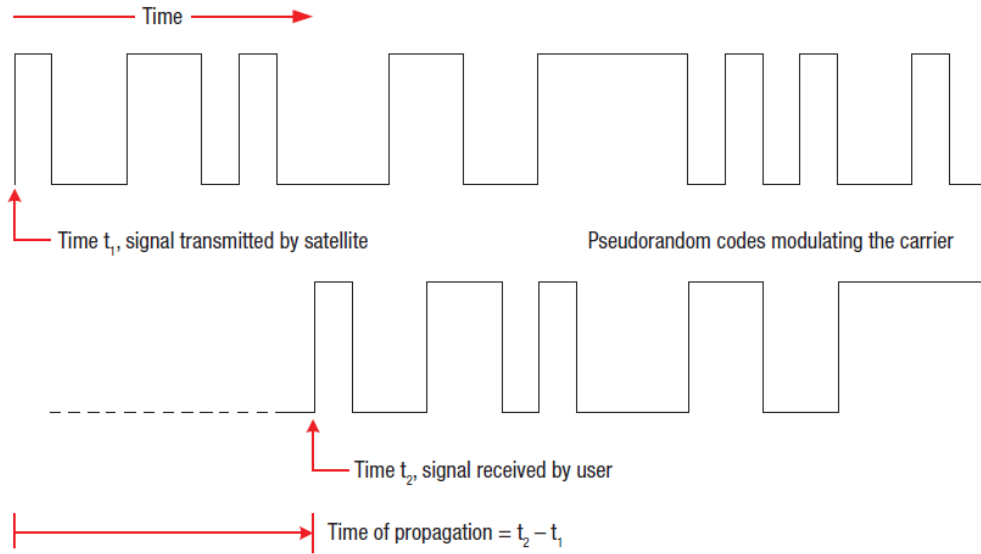


Figura 4.4: Envio/recepção da onda portadora [27].

A pseudo-distância a que se encontra o satélite pode ser calculada pela multiplicação entre o tempo de propagação com a constante da velocidade da luz.

Para calcular a posição, são necessários pelo menos 4 satélites para um plano 3D. Através do método geométrico é possível determinar a posição de um objeto, tal como é demonstrado na figura abaixo.

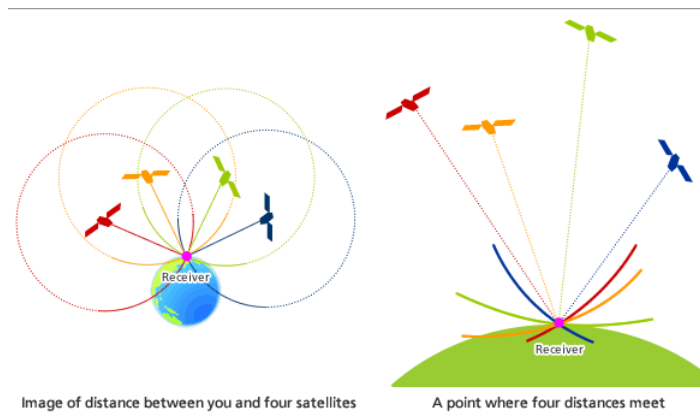


Figura 4.5: Determinação da posição de um recetor GNSS [30].

No entanto, tal como nas comunicações sem fios, esta tecnologia também contém algumas fontes de erro que afetam a precisão no cálculo da pseudo distância de um satélite, tais como:

Contributing Source	Error Range
Satellite clocks	± 2 m
Orbit errors	± 2.5 m
Ionospheric delays	± 5 m
Tropospheric delays	± 0.5 m
Receiver noise	± 0.3 m
Multipath	± 1 m

Figura 4.6: Fontes de erro no cálculo da posição [27].

4.3.1 DGNSS e RTK

Um utilizador do serviço geral de um sistema GNSS pode obter erros menores que 10m para distâncias e de 20ns para o tempo. Para determinadas aplicações, é necessário um maior grau de precisão, integridade e disponibilidade, o que implica a introdução de novas técnicas e metodologias[53].

Para isso, a tecnologia GNSS diferencial oferece vários tipos de sistemas que fornecem correções a um recetor GNSS, eliminando maior parte dos erros explícitos na figura 4.6, exceto os erros relativos a *multipathing* e ruído.

Esta tecnologia baseia-se simplesmente nas estações de referência que possuem recetores fixos, e que já sabem, à partida, as coordenadas precisas da sua posição. Posto isto, de acordo com a posição dos satélites na órbita, é fácil de determinar o tempo de propagação verdadeiro de um sinal GNSS. A diferença entre o tempo medido com o tempo calculado dá origem ao erro diferencial, que é de seguida enviado para outros recetores, designados como estações móveis ou *rovers*, que ao incorporarem estes dados transmitidos conseguem compensar significativamente o erro da posição/navegação. Como o recetor da estação base não sabe quais os satélites que a estação móvel observa, esta envia uma mensagem com um formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime*) com todos os erros diferenciais dos satélites disponíveis através de módulo rádio. Este sistema de posição possui um erro associado de 1 metro.

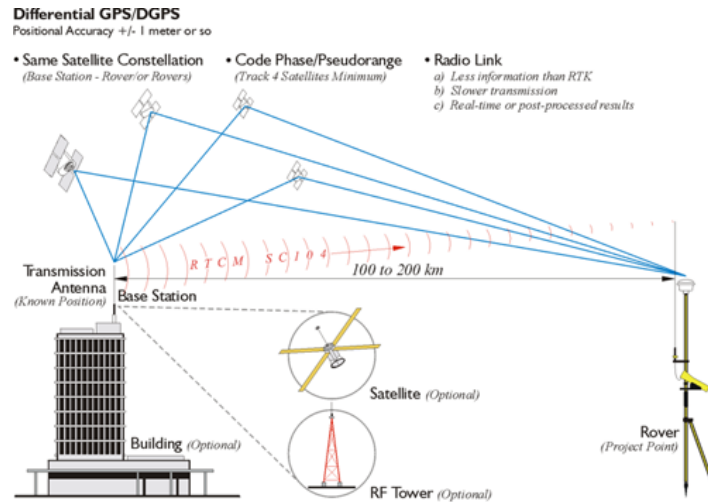


Figura 4.7: Estrutura de um sistema DGPS [31].

Por outro lado, existe a tecnologia RTK que oferece uma precisão na ordem dos centímetros.

A estrutura é semelhante à metodologia DGNSS. A estação de referência para além de enviar os erros diferenciais, envia a sua própria posição, como também correções de fase da onda portadora. Este processo consiste em calcular a distância a que se encontra um satélite, multiplicando o número de ciclos da onda portadora desde o recetor até ao satélite com o comprimento de onda do sinal, tal como é possível ver na figura 4.8. Este método é bastante mais preciso comparado ao método da determinação das pseudo-distâncias, no entanto, torna-se ligeiramente mais complicado devido à determinação do número de ciclos.

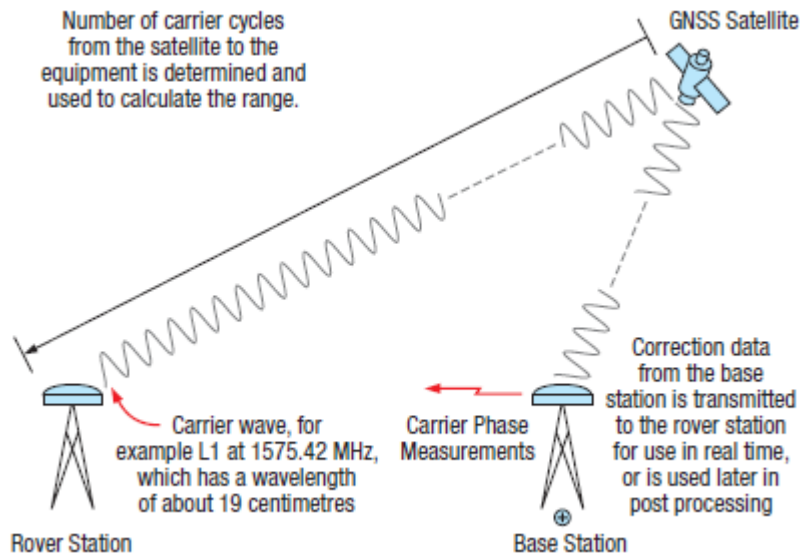


Figura 4.8: Estrutura de sistema RTK [27].

As mensagens transmitidas da base têm um formato RTCM 3.1 e são enviadas através de um *data-link*[54].

O recetor móvel tem de estar num raio menor do que 20km da base-station, para que a latência da comunicação seja a menor possível e os erros, que ocorrem durante a propagação do sinal, sejam semelhantes para as duas estações, pois o recetor móvel calcula a posição tendo em conta as suas próprias medições, juntamente com as correções enviadas pela estação de referência para determinar a sua posição relativamente à posição da estação de referência [55].

Existem vários sistemas que estão explícitos na próxima figura, que ajudam um recetor móvel a melhorar a sua precisão consideravelmente.

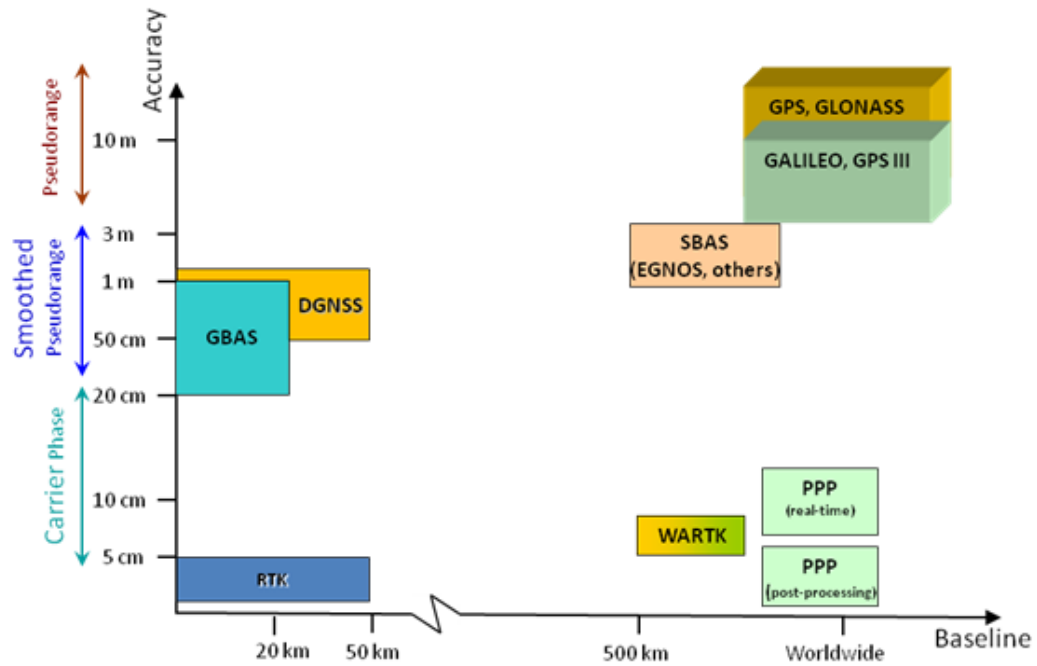


Figura 4.9: Sistemas GNSS [32].

Capítulo 5

Solução Proposta

5.1 Estrutura da plataforma

No terraço do Instituto de Telecomunicações está implementada uma rede de testes AMa-zING (*Advanced Mobile wIreless Network playGround*). A rede é constituída por 24 nós fixos, onde se podem efetuar várias experiências e simulações para redes sem fios. A esta infraestrutura foi instalado um carril metálico (figura 5.1), que é percorrido por um veículo composto por um motor de uma bicicleta elétrica (figura 5.2). Posteriormente, foi colocado um nó sobre este veículo, introduzindo assim o conceito de mobilidade à rede de testes. Esta dissertação foca-se essencialmente na criação de um sistema de controlo *wireless* do veículo relativamente à sua velocidade, posição e direção.



Figura 5.1: Carril metálico.



Figura 5.2: Veículo constituído por peças de uma bicicleta elétrica.

5.2 Veículo

A estrutura física do veículo já se encontrava totalmente funcional e pronta para ser implementada no carril antes de iniciar esta dissertação. Porém, não fazia parte desta qualquer tipo de controlo sem fios sobre existente.

A estrutura metálica existente possibilita o suporte e a instalação dos componentes de um motor similar ao que se encontra em muitas bicicletas elétricas. Esta estrutura tem duas cavidades que permitem a colocação do eixo da roda motriz, oito rolamentos inferiores, que têm a função de estabilizar o veículo, um suporte para as 5 baterias de 12V e uma caixa branca que incorpora um controlador e todas as ligações elétricas fundamentais para o funcionamento do motor elétrico. A posição de quatro rolamentos inferiores e da roda motriz pode ser alterada manualmente, de forma a obter uma melhor aderência e estabilidade.

Uma vez que o circuito elétrico se encontrava totalmente ligado e funcional, foi necessário conhecer as características dos componentes utilizados e todos os sinais de controlo.

Todos os fios passam pelo controlador pois, tendo como base a secção 2.3.2, este é o "cérebro" do motor elétrico. O controlador que é usado ao longo desta dissertação tem as seguintes características e funcionalidades:

- Capaz de controlar motores elétricos com uma potência de 1500 W
- Fonte Alimentação: 60V
- Capaz de fornecer uma corrente até 25A.
- Fase: 60°
- Constituído por 18 MOSFETS
- Cruise-Control
- Sistema de travagem

Neste caso, este controla um motor elétrico que têm uma potência de 250 Watts.

5.2.1 Especificações do Motor Elétrico

Com ajuda de instrumentos como o multímetro, pinça amperimétrica e osciloscópio, foi possível descobrir as especificações elétricas deste sistema, uma vez que estas não se encontravam identificadas.

Fonte de alimentação

O conjunto de 5 baterias de 12V estão montadas em série, logo conseguem fornecer um total de 60V ao sistema.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	I max (A)	Observações
Vermelho	VCC	60	8	A corrente é máxima quando se dá o início da rotação do motor.
Preto	GND	0	8	É a massa do sistema.
Amarelo	Controlo ON/OFF	60	0.09	Permite desligar e ligar o sistema. Este fio passa pela chave de ignição.

Tabela 5.1: Especificações da fonte de alimentação.

Fases do motor

O controlador envia para o motor três sinais PWM, que têm a função de excitar corretamente as bobinas. Estas encontram-se no estator do motor e, assim, criam um campo magnético variável, essencial para a rotação do rotor, tal como foi explicado no tópico 2.3.2.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	I max (A)
Azul, Amarelo, Verde	Controlo de uma das fases do motor	0-30	1.5

Tabela 5.2: Especificações das fases do motor.

A corrente é máxima logo após se iniciar rotação do motor. A uma velocidade constante estas ligações têm uma corrente também constante de 0.5A. O sinal PWM tem uma amplitude que não varia no tempo (GND-60V). O *duty-cycle* da onda quadrada controla a velocidade do motor. A velocidade máxima atinge-se quando a onda quadrada apresenta um *duty-cycle* de 50%, logo a tensão máxima registada nos terminais do multímetro é de 30 Vdc.

Fases de Hall

Existem 5 fios nesta secção e têm a função de informar o controlador da posição em que se encontra o rotor ao longo do tempo. Através desta informação, o controlador consegue aplicar o sinal PWM adequado para duas das três fases do motor.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	Observações
Vermelho	VCC	4.3	Fonte de alimentação dos sensores de Hall.
Preto	GND	0	Massa dos sensores de Hall.
Amarelo, Verde, Azul	Código que indica a posição do rotor	0-4.3	A leitura destes três sinais é efetuada pelo controlador, a partir de três ADC (<i>Analog-Digital-Converter</i>).

Tabela 5.3: Especificações das fases de Hall.

Acelerador/ *Cruise-Control*/Luzes

Este subsistema é a única fonte de controlo de velocidade do motor. Inicialmente, estava ligado ao controlador um manípulo tradicional (figura 5.), que tem um comportamento idêntico a um potenciômetro que faz variar a tensão. Quando o motor se encontrava em repouso, o manípulo oferecia ao controlador uma tensão de 0.89V. Por outro lado, quando o motor chegava à sua velocidade máxima o manípulo colocava uma tensão de 3.1 V à entrada do controlador.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	Observações
Vermelho	VCC	4.3	Fonte de alimentação para o manípulo.
Preto	GND	0	Massa do manípulo analógico.
Verde	Controlo da velocidade	0.89-3.1	Estado repouso - 0.89V Potência máxima - 3.1V

Tabela 5.4: Especificações do acelerador.

Juntamente a este manípulo existe um *push-button* que tem a funcionalidade de ativar/desativar o *cruise-control*. No entanto, este é ignorado para o resto do desenvolvimento do sistema.

Relativamente ao circuito das luzes, resolveu-se não dar muita importância, pois não tem um papel muito significativo para o controlo do veículo.

Velocímetro

Para o controlo da velocidade do motor, é necessário conhecer a sua velocidade instantânea. Esta informação é indicada apenas por um fio, que normalmente está ligado a um módulo digital. O sinal de saída é uma réplica do sinal das fases do motor, visto que é possível identificar um sinal PWM com uma amplitude constante GND-60V e um *duty-cycle* que varia de 0% a 50%.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	I max (A)	Observações
Roxo	VCC	0-31	0.15	Velocidade do motor elétrico.

Tabela 5.5: Especificações do velocímetro.

Regulador de tensão

No sistema do motor elétrico existe um regulador de tensão que transforma os 60V fornecidos pelas baterias para 12V à sua saída.

Cor dos fios	Função	V (Vdc)	I max (A)	Observações
Amarelo	Vin	60	0.15	Tensão de entrada.
Preto	GND	0	0	Massa do sistema.
Vermelho	Vout	11.45	0.15	Tensão de saída do regulador.

Tabela 5.6: Especificações do regulador de tensão 60-12V.

Regulador de potência

O regulador de potência limita a potência do motor elétrico, o que influencia diretamente a sua velocidade máxima. A potência do veículo pode ser alterada através das combinações entre os três fios.

Combinação	Velocidade Máxima(km/h)	Potência%
Amarelo + Azul	32	100
Circuito aberto	22	75
Amarelo+preto	18	50

Tabela 5.7: Combinações que regulam a potência do veículo.

Travões

Existem dois circuitos relativos aos travões. Porém, não foi possível encontrar o modo de funcionamento destes componentes após várias tentativas. Qualquer tipo de tensão colocada nestes terminais, desde de um curto-circuito até à tensão máxima, o motor continuou a exercer uma rotação contínua.

5.3 Estrutura do sistema para o comando wireless do veículo

Após a compreensão dos sinais necessários para o funcionamento do motor elétrico, sucedeu-se o desenvolvimento de um *hardware* externo, com o objetivo de criar um sistema onde a intervenção do ser humano fosse a menor possível, visto que, anteriormente era necessário uma presença humana constante a menos de 2 metros do veículo, para controlar a sua velocidade e posição ao longo do carril, através de um manípulo ligado diretamente ao controlador do motor através de fios. Com esta configuração inicial, tornava-se cansativo para o utilizador e impossível de utilizar maior parte da potência do motor. Para solucionar os problemas descritos é necessário criar um sistema de comando *wireless* e retirar o manípulo analógico.

A próxima imagem demonstra um diagrama dos vários sistemas que foram implementados para controlar a velocidade do veículo, e a deteção da sua posição em tempo real.

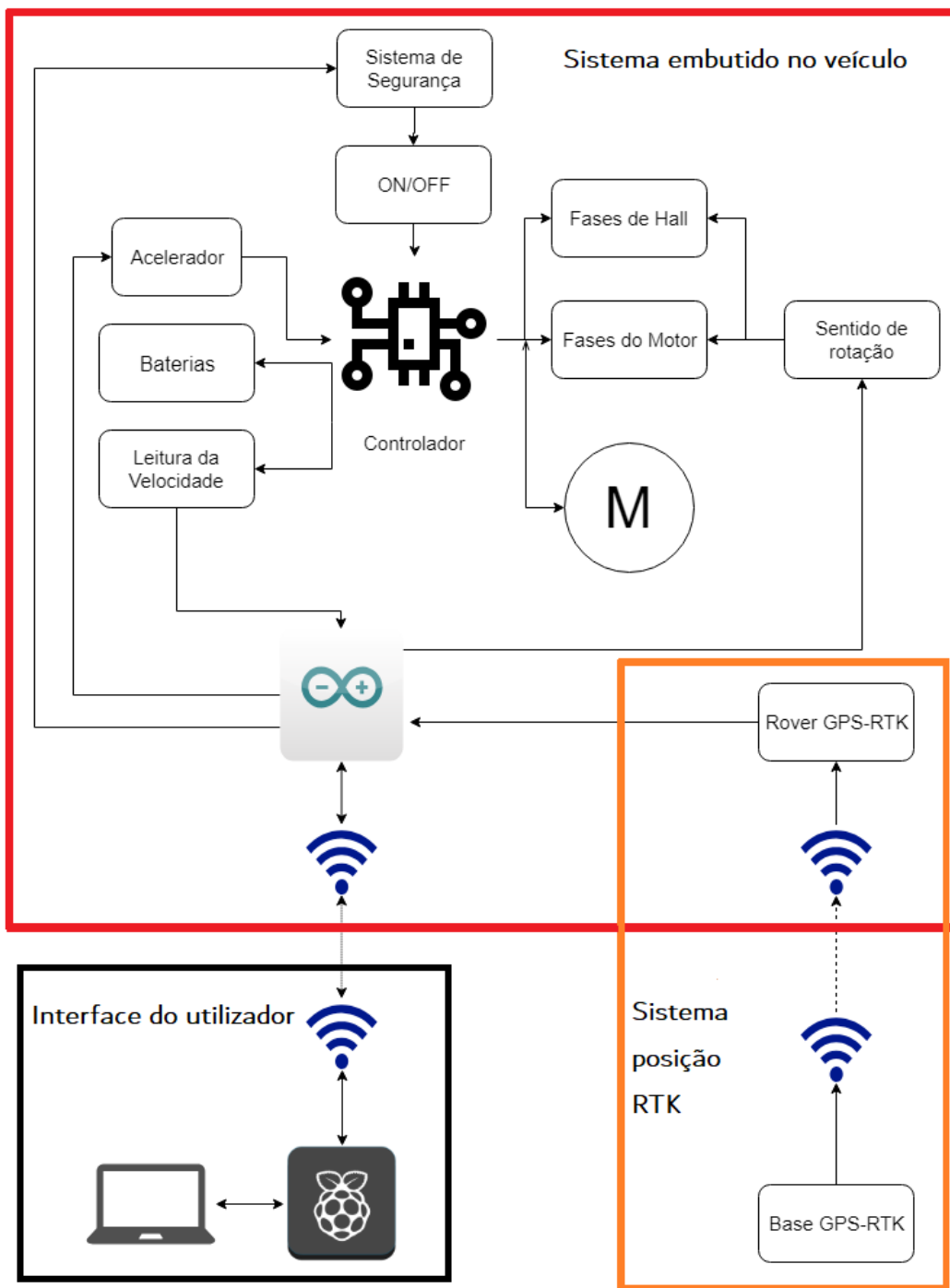


Figura 5.3: Estrutura do sistema desenvolvido.

- **Sistema embutido no veículo:** este sistema possui o *hardware* para o controlo do motor elétrico que está inserido no veículo. Além do controlador, que é necessário para o controlo do motor elétrico, necessitou-se de colocar um micro-controlador(Arduino) para ser o centro de operações dos seguintes subsistemas:

- **Sentido de rotação:** tem a função de definir o sentido de rotação da roda motriz, através da troca das fases do motor e das fases de Hall.
 - **Acelerador:** este subsistema possui a função de substituir o manipulador analógico, oferecendo ao controlador a tensão necessária para atingir a velocidade pretendida.
 - **Baterias:** informa ao micro-controlador a voltagem das baterias.
 - **Leitura da Velocidade:** indica ao micro-controlador a velocidade instantânea da roda motriz.
 - **Sistema de segurança:** tem a função de assegurar que o micro-controlador está a efetuar o programa corretamente. Em caso de falha este desliga o controlador do motor elétrico.
 - **Rover GPS-RTK:** este informa ao micro-controlador a posição instantânea do veículo ao longo do carril, como também a sua velocidade.
 - **Módulo de comunicação:** permite uma comunicação bi-direcional com a interface do utilizador.
- **Interface do utilizador:** Esta é a *gateway* do sistema, que é controlada por um micro-controlador (Raspberry). Este tem um módulo de comunicação sem fios bi-direcional, que está conectado com o sistema embutido no veículo. Desta forma, o utilizador consegue visualizar o estado do veículo através de uma interface gráfica, como também impor a velocidade e o sentido do veículo.
 - **Sistema de posição RTK:** a determinação da posição do veículo é definida através de um sistema RTK, que foi descrito no capítulo 4.3.1. Este possui uma base, que está posicionada num sítio fixo no terraço do Instituto de Telecomunicações, e tem a função de enviar mensagens com as correções, através de um módulo de comunicação sem fios para o módulo *Rover* embutido no veículo. Assim, é possível obter a posição do veículo com uma precisão na ordem dos centímetros.

Capítulo 6

Implementação

O objetivo desta secção é descrever o desenvolvimento em termos de *hardware*, como também ao nível de *software* dos vários sistemas representados na figura 5.3. O código completo pode ser visualizado através do seguinte endereço: <https://github.com/ProjetosAMAZING?tab=repositories>, que possui todos os projetos realizados ao longo desta tese de mestrado.

No apêndice deste documento encontram-se as placas PCB, que foram fabricadas para incorporar todos os componentes necessários.

6.1 Subsistemas acoplados ao veículo

Esta secção demonstra os subsistemas que estão diretamente ligados ao controlador do motor elétrico, sendo estes essenciais para a segurança do sistema e o controlo do sentido/velocidade da roda motriz. Todas as imagens a explicar o funcionamento de cada componente foram retiradas dos seus respetivos datasheets.

6.1.1 Micro-controlador

O micro-controlador embutido no veículo tem a função de ser o "cérebro" de operações, pois tem de controlar o estado do veículo e comunicar em tempo real com o utilizador.

O micro-controlador utilizado é um Arduino Leonardo. A escolha recaiu no facto de possuir experiência prévia, pois durante o meu percurso académico realizei vários projetos tendo como base este micro-controlador. Outra das razões que me levou a escolher este dispositivo foram as suas características e condições, pois eram suficientes para o controlo dos vários subsistemas de uma forma simples e eficaz.

As especificações do Arduino Leonardo são as seguintes:

- Micro-controlador: ATmega32u4
- Nível lógico: 0-5V
- Alimentação recomendada: 7-12V
- Pinos digitais I/O: 20
- Canais PWM: 7
- Conversores analógico-digital: 12

- Corrente DC por pino: 40mA
- Memória Flash: 32kB
- SRam: 2.5kB
- EEPROM: 1kB
- Frequência relógio: 16MHz
- Interfaces: UART,SPI,I2C

A alimentação para este micro-controlador(figura 6.1) tem como base o regulador de tensão previamente instalado no veículo que fornece 11.45V (tabela 5.6). No entanto, foi necessário colocar um outro regulador de tensão de 9V, assim a energia dissipada dos outros reguladores de tensão em série fosse a menor.

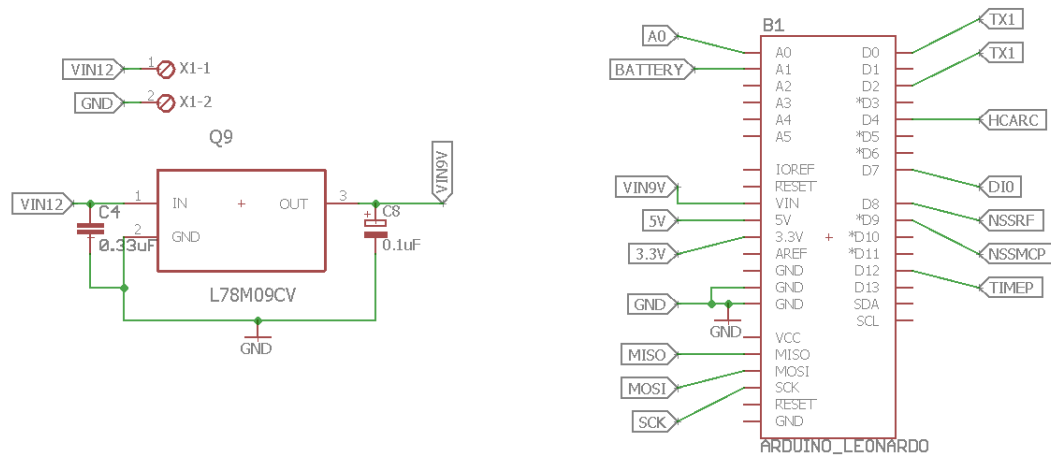


Figura 6.1: Esquema do Arduino Leonardo.

Os portos VIN12 e GND ligam diretamente ao regulador de tensão 60-12V embutido no veículo.

6.1.2 Controlo de velocidade

Para realizar o controlo da velocidade através do micro-controlador, realizaram-se as seguintes tarefas:

- Substituição do manípulo analógico.
- Leitura da velocidade instantânea do veículo.
- Implementação de um controlador PID.
- Máquina de estados do veículo.

Substituição manípulo analógico

Após o estudo efetuado ao sistema no capítulo 5, secção 5.2, foi necessário retirar o manípulo analógico para ser controlado pelo micro-controlador. Portanto, este foi substituído por um módulo DAC (*Digital-Analogic-Converter*) para replicar o mesmo sinal. A escolha do módulo DAC, recaiu para o módulo MCP4921 da Microchip.

Caraterísticas do módulo MCP4921:

- Corrente Sandby: $3.3 \mu\text{A}$
- Corrente em funcionamento: $175 \mu\text{A}$
- Resolução: 12 bits
- Tensão de referência externa
- Settling Time: $4.5 \mu\text{s}$
- Temperatura: -40 até 125°C
- Interface: SPI
- Rail-to-Rail
- Ganho na saída: unitário ou duplicado
- Alimentação: $2.7\text{-}5.5\text{V}$

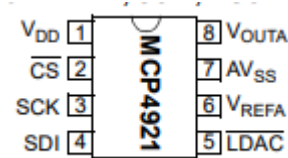


Figura 6.2: Composição do módulo MCP4921.

O circuito integrado está conectado com o micro-controlador da seguinte forma:

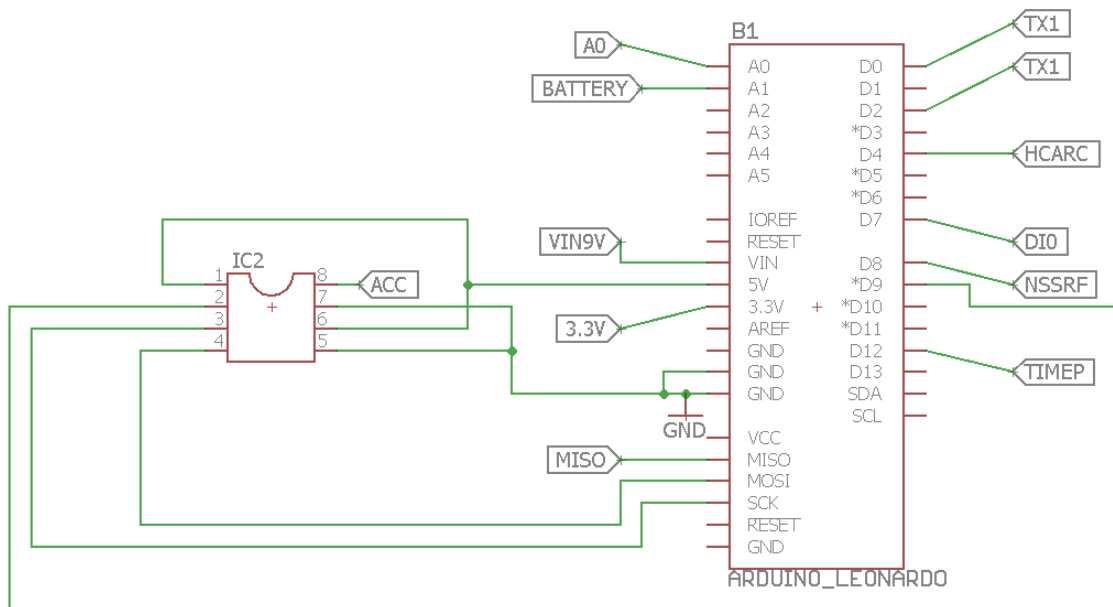


Figura 6.3: Esquemático relativo ao acelerador.

Após a substituição do manípulo analógico e considerando as ligações anteriores na tabela 5.4, o módulo MCP4921 está ligado com o controlador do motor elétrico como será apresentado:

Cor do fio	Função	Porto MCP4921
Vermelho	VCC	Sem ligação
Preto	GND	GND
Verde	Controlo da velocidade	ACC

Tabela 6.1: Ligação entre o controlador do motor elétrico e a DAC.

Para colocar uma tensão na saída é necessário enviar duas tramas com 8 bits através da interface SPI, onde os 12 bits menos significativos indicam a tensão a colocar na saída do módulo e os restantes bits indicam a configuração, tal como é possível visualizar na seguinte figura.

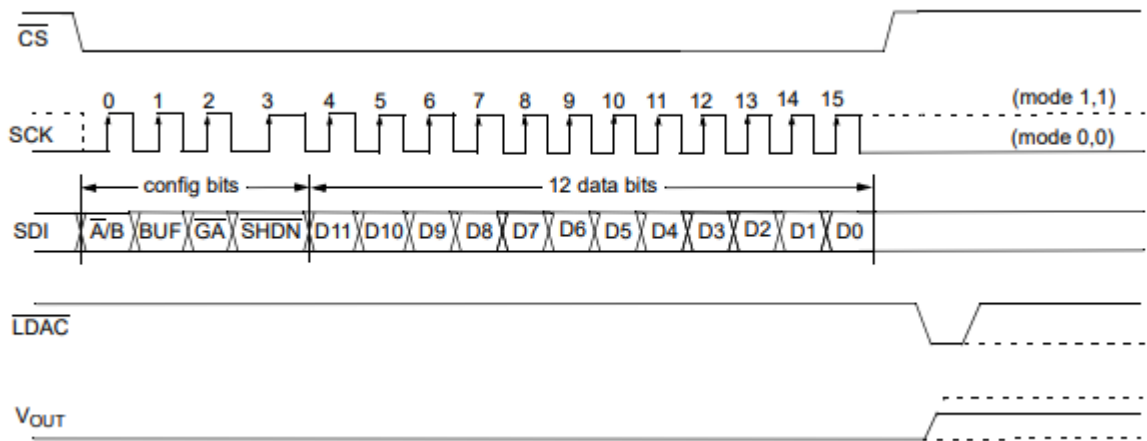


Figura 6.4: Comunicação entre o micro-controlador e a DAC.

Para esta aplicação em concreto, os 4 bits mais significativos que correspondem à configuração da DAC, são estáticos e têm os seguintes valores:

Bits	15	14	13	12
Valor	0	1	1	0
Observações	Escrita dacA.	Buffer de entrada ativo.	Ganho unitário.	Impedância de saída elevada.

Tabela 6.2: Bits de configuração do módulo MCP4921.

A fórmula para calcular a tensão de saída do circuito integrado é a seguinte:

$$V_{ACC} = \frac{D(11,0)}{4096} \times 5 \quad (6.1)$$

Leitura da velocidade

A velocidade do motor elétrico é extraída pelo fio descrito na tabela 5.5. A estratégia para se saber a velocidade instantânea será recolher o valor médio do sinal, tal como é possível medir no multímetro. Para isso necessitou-se de efetuar um circuito passa-baixo de segunda ordem com a seguinte estrutura:

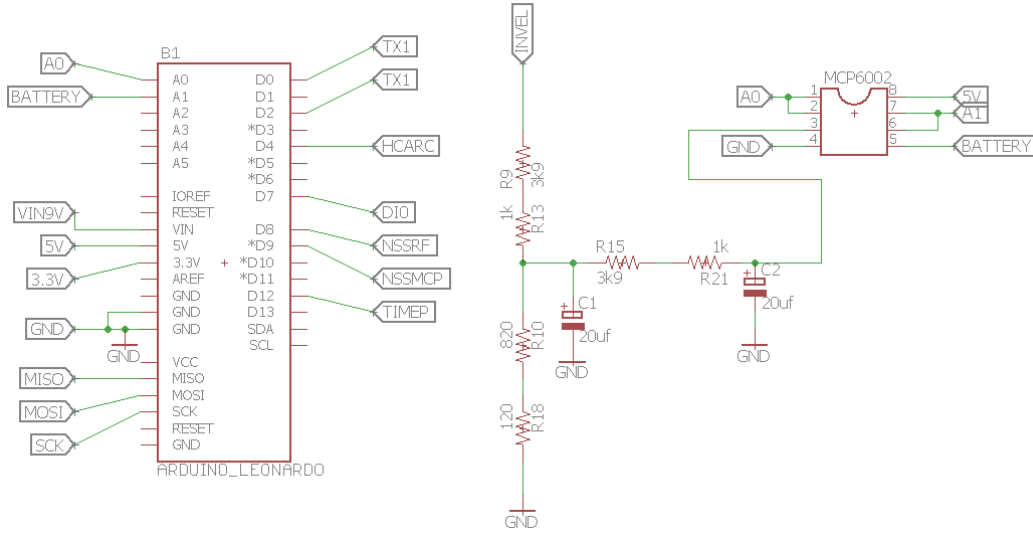


Figura 6.5: Circuito relativo à leitura de velocidade

Tal como é possível ver na imagem anterior, o sinal passa primeiro por um divisor resistivo, que reduz a 1/6 a amplitude do sinal original e pode ser expressa pela seguinte fórmula matemática:

$$V_{divR} = \frac{820 + 120}{4900 + 820 + 120} \times INVEL \text{ V} \quad (6.2)$$

Como a entrada INVEL é um sinal PWM com uma amplitude máxima de 62V, significa que a tensão máxima à saída do divisor resistivo é a seguinte:

$$V_{divR} = \frac{820 + 120}{4900 + 820 + 120} \times 62V = 9.9820V \quad (6.3)$$

De seguida atravessa um filtro passa-baixo, onde a frequência de corte foi ajustada manualmente ao trocar o valor das resistências com o objetivo de obter o menor ruído, e assim, o micro-controlador obter uma leitura perfeita da velocidade da roda motriz. Começou-se por uma frequência de corte de 20Hz porém, os valores obtidos não eram satisfatórios, devido à presença de ruído, logo, precisou-se de baixar para uma frequência de corte de 4Hz para obter o valor médio do sinal de entrada.

A função de transferência de um sistema de segunda ordem é expressa da seguinte forma:

$$H(s) = \frac{W_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2} \quad (6.4)$$

Que pode ser traduzida para um filtro passa-baixo da seguinte maneira:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (6.5)$$

Neste caso R_1 é a resistência equivalente do divisor resistivo que tem o seguinte valor:

$$R_1 = R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{4900} + \frac{1}{940}} = 788.6986\Omega \quad (6.6)$$

O somatório das resistências R_{15} e R_{21} é R_2 , o que perfaz uma resistência equivalente de $4.9k\Omega$, e os dois condensadores possuem o mesmo valor de $20 \mu F$. Portanto, substituindo estas variáveis no sistema de segundo grau, obtemos os seguintes gráficos que especificam o comportamento do filtro passa-baixo:

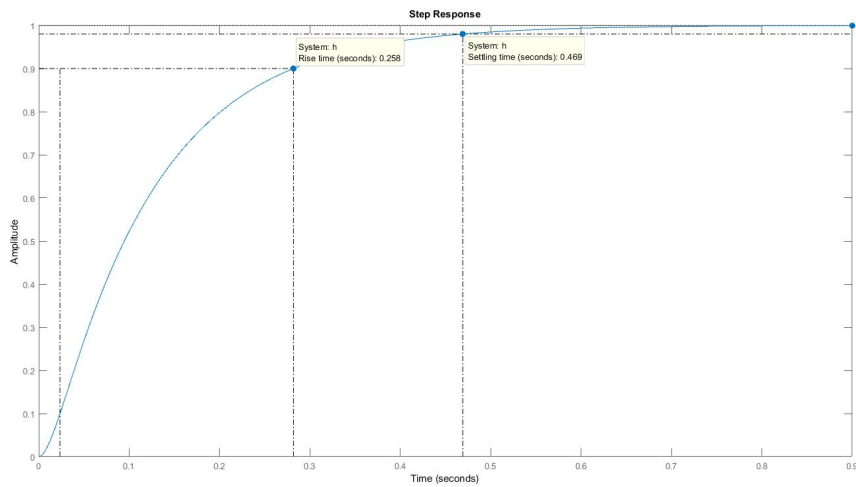


Figura 6.6: Comportamento do circuito passa-baixo.

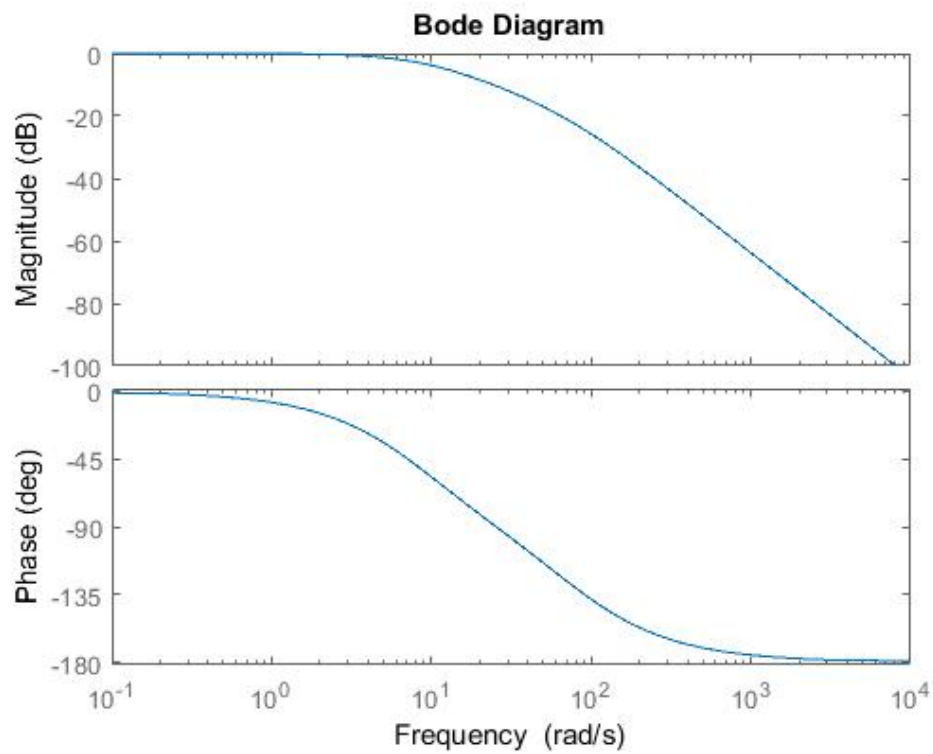


Figura 6.7: Diagrama de Bode.

Como o *duty-cycle* máximo é 50%, significa que a amplitude de saída do filtro passa baixo vai ser cerca de 5V, como se pode confirmar na seguinte imagem:

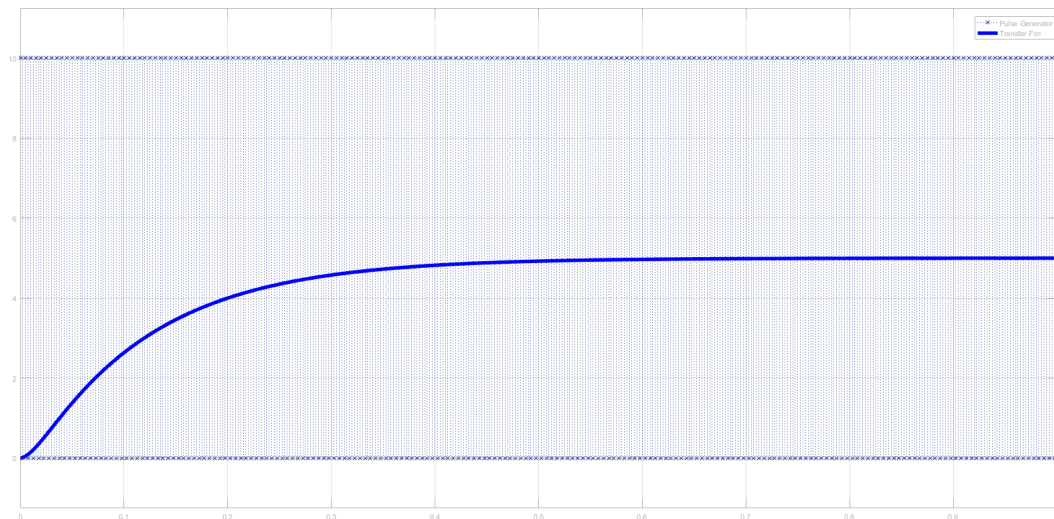


Figura 6.8: Saída do filtro passa-baixo.

Para finalizar, na saída do filtro passa-baixo está presente um *buffer* constituído por um

Op-Amp Rail-to-Rail, para não influenciar as impedâncias presentes neste circuito, e promovendo assim uma boa leitura por parte da ADC do micro-controlador.

No entanto, durante o desenvolvimento desta Tese de Mestrado, este projeto esteve sujeito a transformações e a novas adições ao longo do tempo, por isso após a implementação do módulo GPS surgiu um novo método na leitura da velocidade instantânea do veículo.

Implementação de um controlador PID

O objetivo final do controlo de velocidade do veículo é criar um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este controlador de malha fechada é bastante utilizado em vários sistemas industriais. O controlador efetua o cálculo do erro ao longo do tempo, ou seja, a diferença entre o valor desejado e o valor da saída do sistema, que será compensado através dos seguintes blocos:

- P: gera um sinal de saída proporcional ao erro.
- I: sinal de saída é o somatório do erro ao longo do tempo.
- D: produz um sinal de saída proporcional à variação do erro.

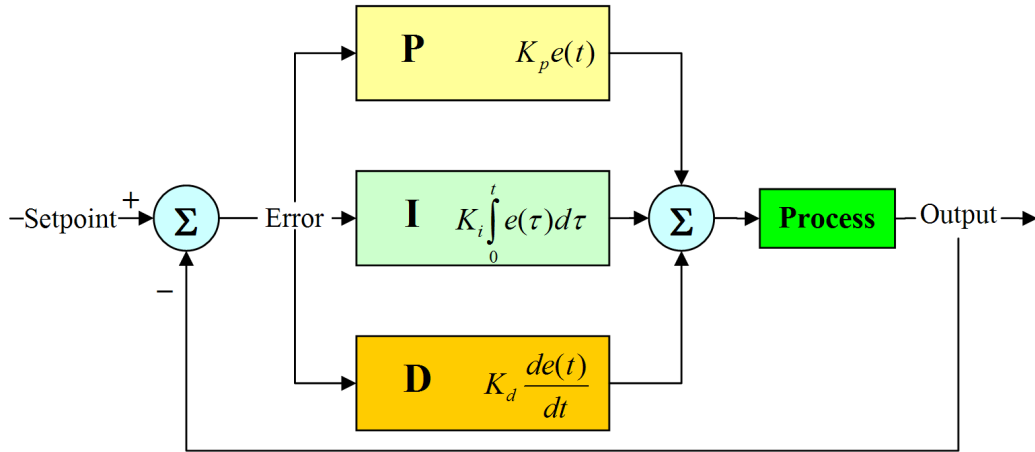


Figura 6.9: Controlador PID [33].

O modelo deste controlador pode ser expresso pela seguinte expressão matemática:

$$Output(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6.7)$$

$$e(t) = Input(t) - Output(t) \quad (6.8)$$

Onde K_p é a constante de ganho proporcional, K_i a constante de ganho do integrador e K_d a constante do derivador. Estes parâmetros têm de ser ajustados para conseguir que o sistema compensado cumpra determinadas especificações. Estas especificações podem ser expressas em termos de resposta em regime estacionário e em regime transitório, ou em termos de resposta em frequência[56].

Neste caso concreto, o erro é a diferença entre a velocidade pretendida pelo utilizador e a velocidade instantânea do veículo, portanto, o modelo desenhado foi o seguinte:

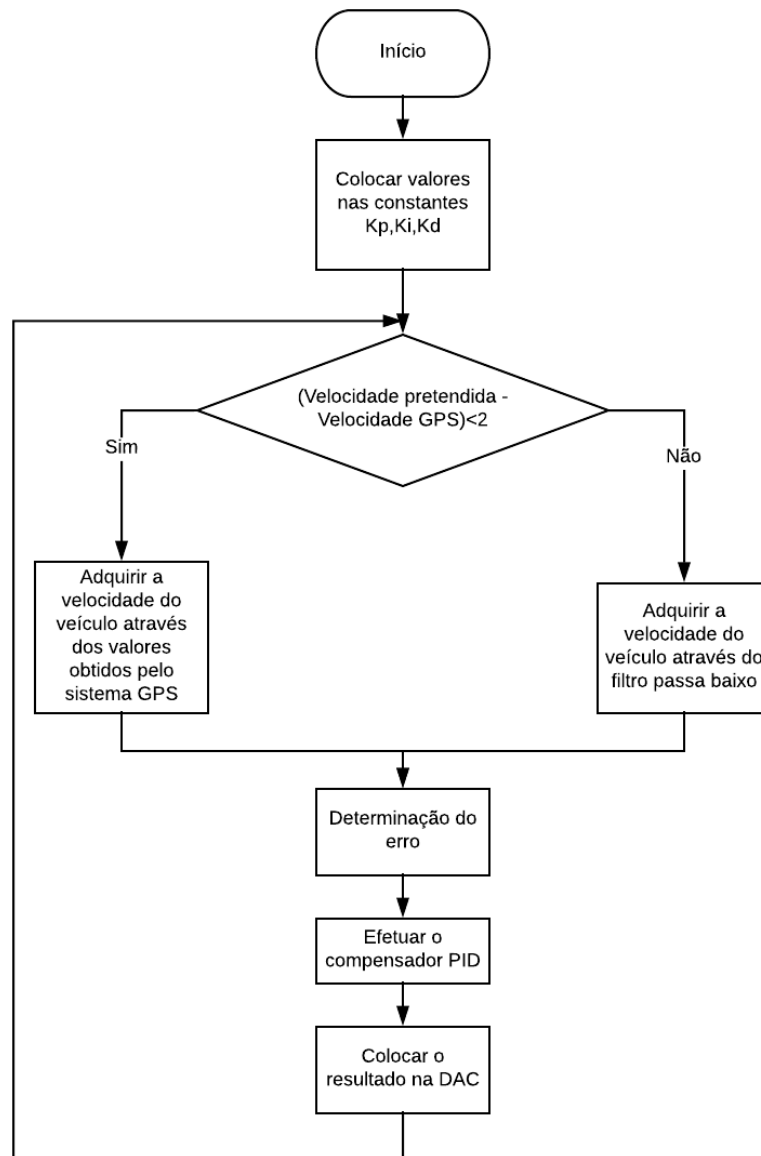


Figura 6.10: Controlador PID.

A razão de colocar as duas entradas diferentes para a leitura da velocidade foi derivada ao sistema físico em si, pois a força de atrito realizada pelas rodas inferiores do veículo, que servem como suporte, depende da forma que o utilizador as coloca, ou seja, depende da folga entre as rodas inferiores com a estrutura metálica do circuito. Este efeito é bastante evidente nas curvas e a pouca aderência da roda motriz, faz que esta patine em certas condições, pelo que a velocidade do veículo é diferente da roda motriz. Este acontecimento é notório na aceleração do veículo ou em velocidades baixas.

Portanto, dividiu-se o controlador PID em duas fases:

- **Primeira fase:** o cálculo do erro do controlador PID tem a ajuda da leitura da velocidade que é extraída por parte do circuito filtro passa-baixo. Desta forma, se existir falta de aderência na aceleração, a roda motriz não ultrapassa o valor desejado pelo utilizador.
- **Segunda fase:** quando a velocidade adquirida pelo módulo GPS convergir para a velocidade pretendida pelo utilizador, este passa a ser o método principal de leitura da velocidade instantânea e consequentemente para o cálculo do erro. Assim, é possível compensar a roda motriz quando não possuir aderência em certos pontos do circuito.

A escolha das constantes K_p , K_d e K_i foi feita manualmente, de acordo com o comportamento da roda motriz no ar, sem intervenção de qualquer força de atrito.

Começou-se apenas por colocar as constantes K_d e K_i a 0, e incrementou-se a constante K_p , até que o comportamento da roda motriz em regime estacionário fosse o mais estável e o mais próximo do valor final. De seguida, foi necessário aumentar a constante K_i em pequenas porções para combater o erro em regime estacionário, e durante o regime transitório, não existir qualquer tipo de sobre-elevação. Para finalizar, aumentou-se a constante K_d , para obter um sistema mais reativo às diferenças do erro, que são principalmente causadas pela força de atrito.

No entanto, o veículo não tem qualquer tipo de sistema de travagem, o que seria fundamental para ajustar a velocidade. Por outras palavras, quando o erro é positivo, ou seja, a velocidade do veículo é superior à velocidade pretendida, a única fonte que compensa este erro é a força de atrito entre as rodas e o circuito metálico. Portanto, como já foi referido, a força de atrito é mais intensa nas curvas do circuito e é compensada ao colocar mais potência na roda motriz, porém, quando o veículo finaliza a curva este entra já com uma certa velocidade na reta, uma vez que a força de atrito é bastante menor, o que contribui para tornar o sistema instável. Logo, foi necessário diminuir, principalmente, as constantes K_p e K_d de forma a combater esta deficiência e encontrar um equilíbrio.

A última solução encontrada seria quando a roda motriz ultrapassasse os 2 Km/h do valor pretendido, colocava-se a potência da mesma a zero, mantendo ao mesmo tempo as componentes do sistema do PID até a velocidade convergir novamente. Isto contribui para um comportamento mais reativo por parte do veículo nas curvas e a um decréscimo mais brusco da velocidade do veículo. No entanto, esta solução não foi testada apropriadamente derivado deficiências do funcionamento do motor elétrico, que foram aumentando com o uso.

Máquina de estados do veículo

A máquina de estados do veículo define o comportamento do mesmo.

Implementou-se no código um temporizador com um período de 100ms, que executa a máquina de estados.

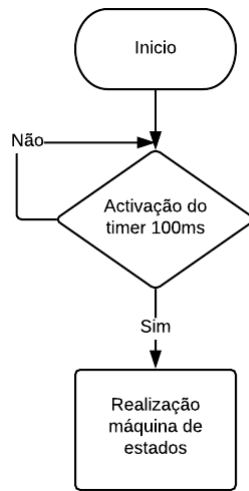


Figura 6.11: Execução da máquina de estados.

O estado da roda motriz está dependente das mensagens recebidas pelo utilizador, que definem a velocidade e o sentido do veículo. A máquina de estados possui a seguinte constituição:

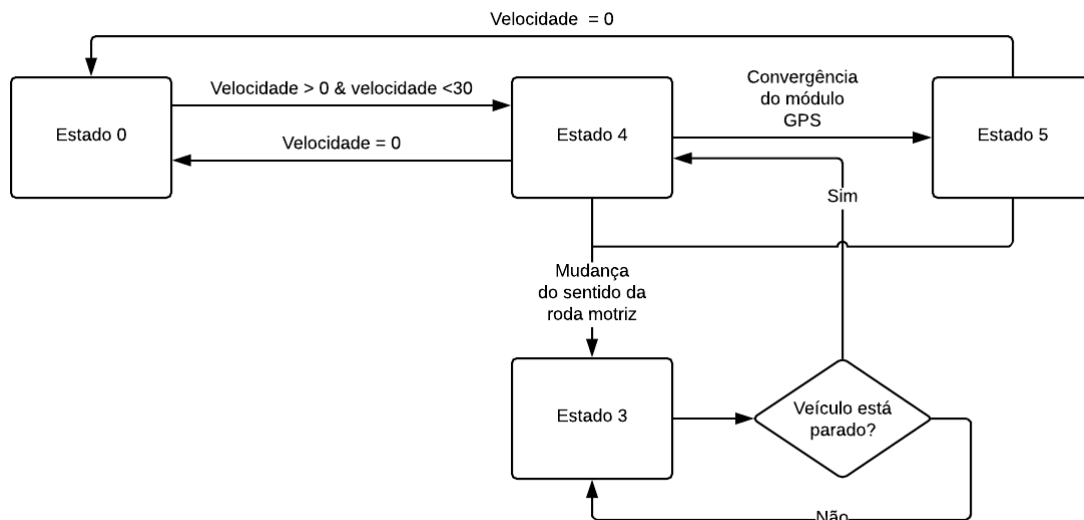


Figura 6.12: Máquina de estados.

Os estados exibidos na imagem anterior possuem as seguintes características:

- **Estado 0:** não se coloca nenhuma potência no motor, portanto, este permanece em repouso.
- **Estado 3:** este estado apenas acontece quando se pretende mudar o sentido da roda motriz. Logo, este troca as fases do motor e de Hall para executar o sentido pretendido. Apenas transita para o próximo estado, quando a velocidade do veículo é nula.

- **Estado 4:** executa o controlador PID através da leitura de velocidade por parte do circuito passa-baixo.
- **Estado 5:** executa o controlador PID através da leitura de velocidade por parte do módulo GPS.

6.1.3 Sentido de rotação

Alguns controladores de um motor elétrico proporcionam a opção de definir o sentido da rotação da roda motriz, mas este não é caso. Portanto, com o conhecimento adquirido no capítulo 2.3, é necessário enganar o controlador para inverter o sentido. A solução encontrada foi trocar duas das três fases do motor elétrico e das fases de Hall.

As próximas tabelas demonstram o comportamento do motor elétrico de acordo com as combinações realizadas:

Combinações	Verde	Amarelo	Azul	Observações
1	Verde	Amarelo	Azul	Combinação standard para exercer rotação no sentido positivo.
2	Azul	Amarelo	Verde	Parado.
3	Verde	Azul	Amarelo	Barulho/Parado.
4	Amarelo	Verde	Azul	Parado.

Tabela 6.3: Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo-Amarelo/ Verde-Verde/Azul-Azul.

Combinações	Verde	Amarelo	Azul	Observações
1	Verde	Azul	Amarelo	Parado porém, a fazer força.
2	Verde	Amarelo	Azul	Parado porém, a fazer força.
3	Azul	Amarelo	Verde	Rotação no sentido inverso.
4	Amarelo	Verde	Azul	Rotação no sentido positivo/ aparenta ter mais velocidade / Barulho fora do comum.

Tabela 6.4: Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo-Verde/ Verde-Amarelo/Azul-Azul.

Combinações	Verde	Amarelo	Azul	Observações
1	Verde	Amarelo	Azul	A fazer força porém, parado.
2	Verde	Azul	Amarelo	Rotação no sentido inverso.
3	Azul	Amarelo	Verde	Rotação com barulho fora do comum.
4	Amarelo	Verde	Azul	Parado a fazer força.

Tabela 6.5: Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo-Amarelo/ Verde-Azul/Azul-Verde.

Combinações	Verde	Amarelo	Azul	Observações
1	Amarelo	Verde	Azul	Rotação no sentido inverso.
2	Verde	Amarelo	Azul	Parado.
3	Azul	Amarelo	Verde	Parado a fazer força.
4	Verde	Azul	Amarelo	Rotação no sentido positivo, embora com barulho fora do comum.

Tabela 6.6: Combinações das fases do motor elétrico, quando as fases de Hall são Amarelo-Azul/ Verde-Verde/Azul-Amarelo.

Como se pode constatar, existem 3 combinações que garantem a rotação da roda motriz no sentido inverso. Inicialmente, efetuou-se a segunda combinação da tabela 6.5, porém, em aproximadamente 30% dos testes realizados com esta configuração, a roda motriz permanecia estática e a exercer força durante dois segundos e, ao aplicar-se uma força externa, a ajudar o início da rotação, esta era capaz de continuar com sucesso ao longo do tempo. Portanto, foi possível concluir que esta configuração era altamente dependente da posição inicial da roda motriz, o que torna inviável para o sistema a ser desenvolvido.

Posteriormente, passou-se para a primeira combinação da tabela 6.6, que consegue trocar o sentido da roda motriz com 100% de eficácia, sem depender da posição inicial da roda.

A alteração das fases do motor, é efetuada por um relé DPDT (*Double-Pole Double-Throw*), que tem o seguinte esquema elétrico:

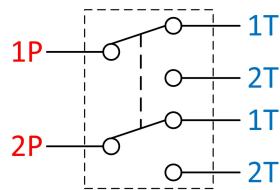


Figura 6.13: Esquema de um relé DPDT.[34]

Tendo em conta as especificações elétricas das fases do motor, descritas na tabela 5.2, incorporou-se o relé G2R-2-S DC5(S) produzido pelo fabricante Omron Electronics. Este componente tem as seguintes características:

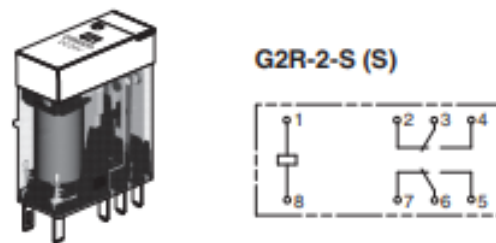


Figura 6.14: Relé G2R-2-S DC5(S).

- Tipo de bobina: Non-Latching
- Corrente operação da bobina: 106mA.
- Tensão na bobina: 5 Vdc.
- Forma dos contactos: DPDT (2 - C)
- Tensão máxima nos contactos: 380 VAC , 125 Vdc.
- Corrente máxima nos contactos: 5A
- *Release Time*: 10ms
- *Operate Time*: 15ms
- Tipo de montagem: *socket*
- Temperatura: -40° - 70°

O *socket* P2RF-08-E facilita as ligações entre as fases do motor com os terminais do relé e caracteriza-se pela seguinte estrutura:

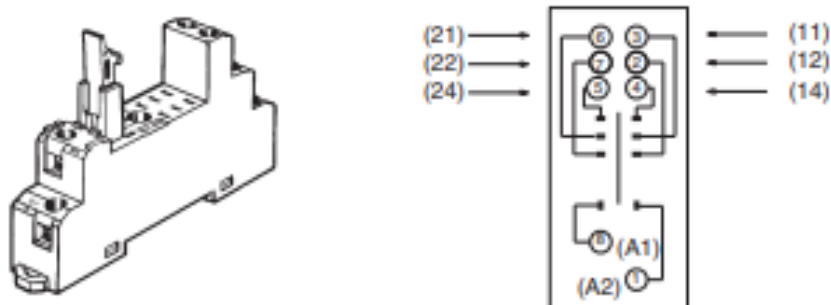


Figura 6.15: *Socket* associado ao relé G2R-2-S DC5(S).

Para controlar o estado da bobina do relé, é necessário um circuito que seja capaz de efetuar a mesma função de um interruptor (ON/OFF). A próxima figura demonstra o circuito criado para o controlo do relé.

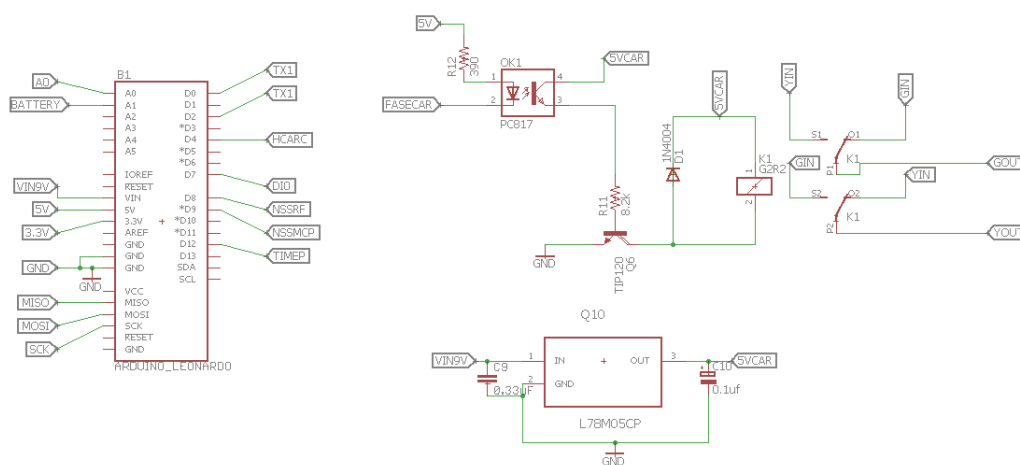


Figura 6.16: Esquemático relativo à mudança de fases do motor.

Este circuito começa por um opto-acoplador (PC817), que é controlado pelo porto FASECAR do Arduino Leonardo, para isolar a fonte de alimentação de 5V proveniente de um regulador de tensão LM7805CP. Se o porto FASECAR estiver no estado LOW significa que existe ligação entre o pino 3 e 4 do opto-acoplador; no caso contrário, a ligação entre estes dois pinos é quebrada.

De seguida, colocou-se um transistor Darlington TIP120, que é capaz conduzir correntes elevadas e de realizar a função de um *switch*. Neste caso, é necessário colocar entre os terminais da bobina do relé uma corrente de 106mA. Logo de acordo com o *datasheet* do transistor TIP

120, este encontra-se na zona de saturação quando $I_c = 250I_b$ portanto:

$$I_b = \frac{106 \times 10^{-3}}{250} = 4.24 \times 10^{-4} A \quad (6.9)$$

Assim sendo, o cálculo da resistência da base será a seguinte, tendo em conta que o V_{be} de saturação tem um valor próximo de 1.25V, quando a corrente do coletor é cerca de 100mA:

$$R_b = \frac{5 - 1.25}{4.24 \times 10^{-4}} = 8.8443k\Omega \quad (6.10)$$

Acabou-se por colocar apenas uma resistência de 8.2k Ω , que é capaz de realizar com sucesso a ativação e desativação do relé.

Para finalizar, encontra-se um diodo *flyback*, que tem como objetivo eliminar qualquer tipo de picos de tensão provenientes da bobina do relé.

Os contactos do relé 3 e 6 (figura 6.14), recebem as fases do motor verde e amarelo, uma vez que são capazes de alterar o sentido de rotação da roda motriz (tabela 6.5). Quando o relé se encontra desativado, este mantém a configuração *standard* que corresponde à combinação 1 da tabela 6.3. Por outro lado, quando o relé é ativado inverte estas duas fases, ou seja, efetua a combinação 1 da tabela 6.5.

Para uma melhor compreensão, a próxima tabela descreve o comportamento deste circuito.

Porto FASECAR	Estado relé	Observações
HIGH	Desativado	Configuração de fábrica, a roda motriz efetua a rotação no sentido convencional. O relé está desativado pois o transistor TIP120 está na região <i>cut-off</i> .
LOW	Ativo	Inversão do sentido da roda motriz, uma vez que o transistor possibilita a ativação do relé que troca as duas fases do motor.

Da mesma forma, realizou-se a inversão das fases de Hall. No entanto, em vez de usar outro relé eletromecânico DPDT, foram utilizados dois relés MOSFETS (SPDT) LLC120. Inicialmente estes módulos iriam ser implementados para a escolha da potência do motor elétrico, porém achei que esta não seria uma função com muito uso, logo foram estes foram aproveitados para trocar as fases de Hall. Estes módulos possuem a seguinte estrutura e características:

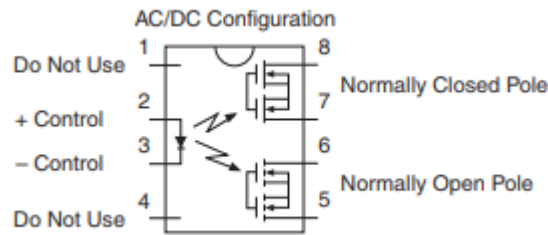


Figura 6.17: Estrutura do módulo LLC120.

- Corrente máxima nos contactos: 170mA
- On-Resistência: 20Ω
- Corrente de controlo para ativação (Max): 10mA
- Corrente de controlo para a desativação: 0.7mA
- V_{Max} aplicado aos MOSFETS: 250V

Como se pode verificar pela figura 6.18, estes dois relés efetuam a mesma função descrita pelo relé eletromecânico, no entanto, estes trocam as fases de Hall de acordo com o sentido desejado pelo utilizador. A ativação e desativação é realizada pelo porto do Arduino Leonardo HCARC, pois, quando este se encontra no estado HIGH, os dois relés encontram-se desativados, o que proporciona o sentido da roda motriz no sentido convencional, por outro lado, quando o estado do porto muda para o estado LOW, estes efetuam a troca das fases de Hall, que promove a inversão do sentido da roda motriz.

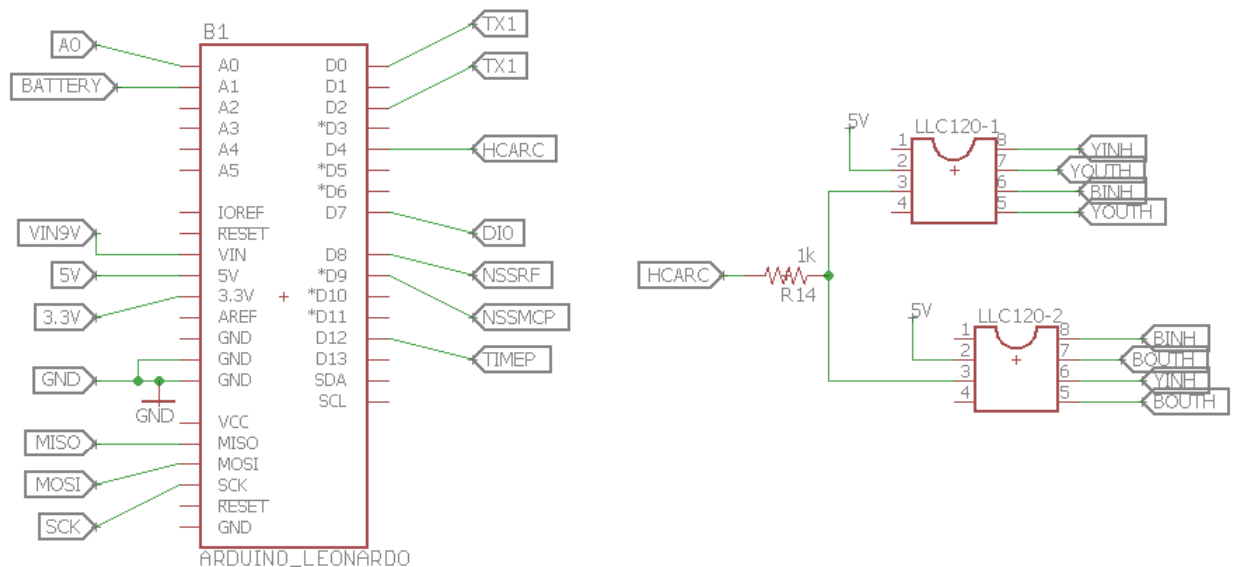


Figura 6.18: Circuito que produz a troca das fases de Hall.

6.1.4 Sistema de segurança

Foi implementado um sistema de segurança minimalista, para não existir qualquer tipo de erros durante a execução do programa principal do Arduino Leonardo.

Para isso, implementou-se o módulo SN74LS123N, que é *retriggable monostable multivibrator*, cuja função é realizar um *watchdog* por *hardware*. Por outras palavras, este recebe sinais por parte do micro-controlador que indicam se o programa está a ser efetuado com sucesso. Caso estes sinais parem de ser fornecidos a este módulo durante uma janela de tempo bem definida, este desliga automaticamente as funções do veículo.

A próxima figura identifica os blocos principais do programa desenvolvido.

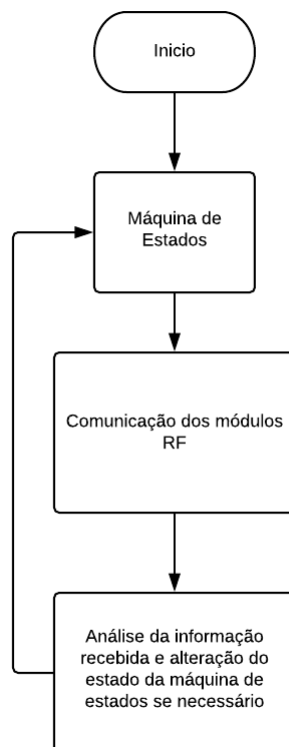


Figura 6.19: Sequência de blocos executados pelo *software*.

Os blocos de análise de estados e análise de informação recolhida, apenas são efetuados em certos períodos, pois estão dependentes de *timers* do micro-controlador. No entanto, estes são efetuados na seguinte sequência:

- **Máquina de estados:** o micro-controlador verifica a *flag* do *timer* correspondente a este bloco. Caso a *flag* for positiva, este executa o estado que está atribuído ao veículo.
- **Comunicação RF:** verifica se existe a receção de um pacote. Caso exista, este envia logo de seguida um pacote com as informações instantâneas do veículo. Este bloco será explicado mais detalhadamente no capítulo 6.3.
- **Análise de informação:** é responsável por verificar se o *timer* correspondente a este

bloco despertou ou não uma *flag*. Caso a *flag* possua um valor positivo, efetua-se uma análise da informação recolhida durante a janela temporal do mesmo *timer*. Consoante os valores finais calculados por esta análise, efetua-se uma alteração na máquina de estados, se necessário.

Ao nível de *hardware* este sistema está composto da seguinte forma:

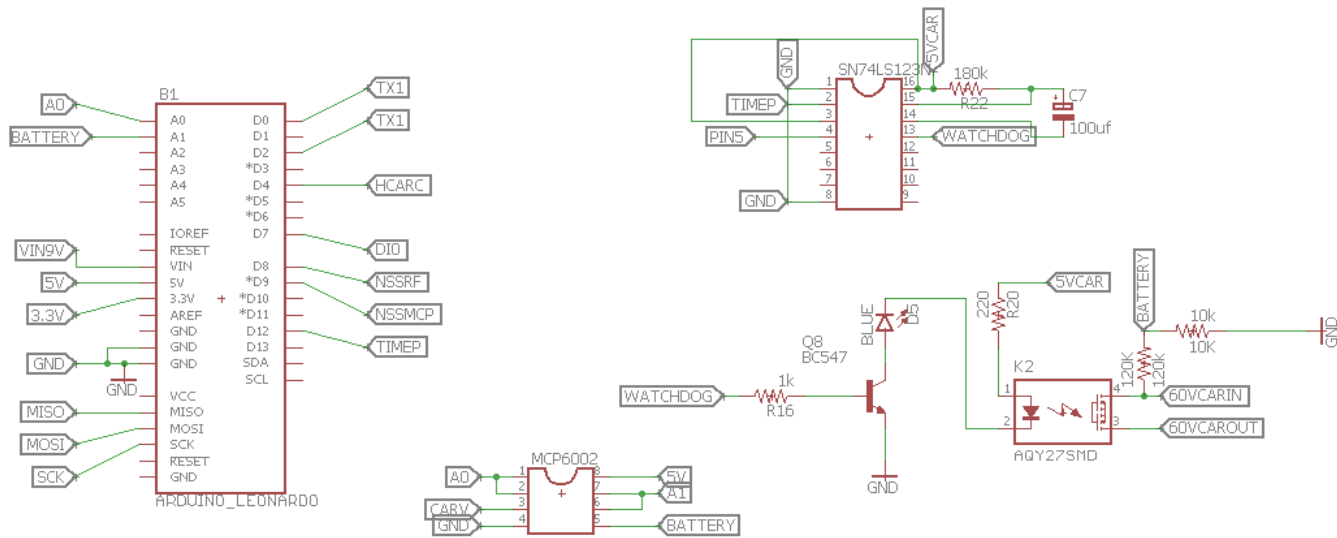


Figura 6.20: Esquema do módulo de segurança.

O módulo SN74LS123N tem a seguinte constituição:

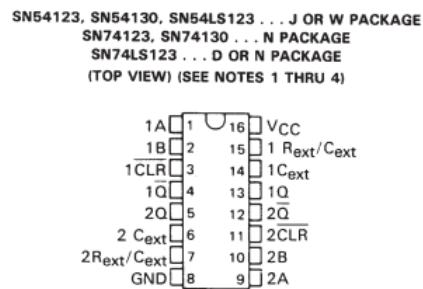


Figura 6.21: Estrutura do módulo SN74LS123N.

O porto do Arduino Leonardo TIMEP altera sempre o seu estado (HIGH/LOW) assim que um dos blocos descritos anteriormente for concluído com sucesso. A próxima imagem ilustra o comportamento e o funcionamento deste módulo ao longo do tempo.

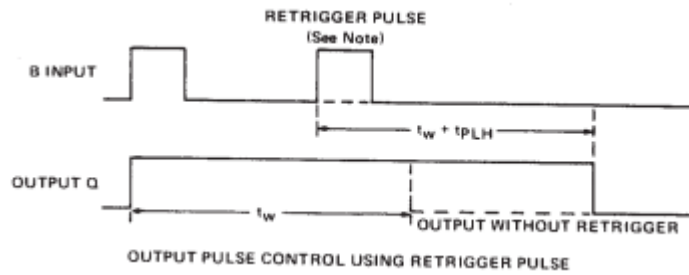


Figura 6.22: Diagrama temporal do módulo SN74LS123N.

As ligações dos portos A, B e CLEAR do circuito integrado definem o comportamento da saída Q, como se pode verificar na próxima imagem:

'123, '130, 'LS123
FUNCTION TABLE

INPUTS			OUTPUTS	
CLEAR	A	B	Q	\bar{Q}
L	X	X	L	H
X	H	X	L [†]	H [†]
X	X	L	L [†]	H [†]
H	L	↑	⌋	⌈
H	↓	H	⌋L	⌈
↑	L	H	⌋	⌈

Figura 6.23: Funções do módulo SN74LS123N.

De acordo com esta tabela, utilizou-se a configuração que está envolvida por um retângulo vermelho, ou seja, sempre que existe uma transição positiva no porto B dentro da janela temporal, a saída Q permanece no estado HIGH.

A janela temporal que está definida na figura 6.22 como t_w é definida pela seguinte expressão:

$$t_w = 0.33 \times R_T \times C_{ext} \quad (6.11)$$

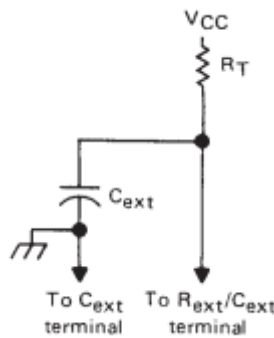


Figura 6.24: Circuito relativo ao cálculo da janela temporal.

Substituindo os valores $R_T = 180k\Omega$ e $C_{ext} = 100\mu F$, obtêm-se o seguinte resultado:

$$t_w = 0.33 \times 180 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 5.94s \quad (6.12)$$

O porto \overline{Q} controla o comportamento do opto-isolador AQY275 da Panasonic, que tem as seguintes caraterísticas:

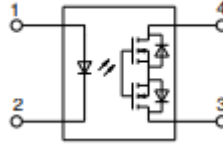


Figura 6.25: Opto-isolador AQY275.

- Corrente máxima na carga: 2A @60V
- Voltagem máxima na carga: 400V
- Corrente de entrada: 5mA
- Led dropout V: 1.25V

A corrente no coletor do transistor tem de gerar 5mA, logo, os cálculos para a determinação da resistência R_{20} são os seguintes:

$$\begin{aligned} V_{DD} - V_{R_{20}} - VDO_{AQY275} - VDO_{LED5} &= 0 \\ V_{R_{20}} &= 5 - 1.25 - 2.7 \\ R_{20} &= \frac{1.05}{5 \times 10^{-3}} \\ R_{20} &= 210\Omega \end{aligned} \quad (6.13)$$

Então, foi implementada uma resistência de 220Ω .

Os contactos do opto-isolador AQY275 encontram-se ligados com o fio amarelo referido na tabela 5.1, que possui a função de ligar/desligar o controlador do motor elétrico.

A próxima tabela sumariza o estado de alguns portos do circuito e as suas funções:

MCU	Q	\overline{Q}	AQY275	Veículo
Altera o estado do porto TIMEP ao longo do tempo.	HIGH	LOW	Ativo	Encontra-se em funcionamento.
Deixa de alterar o estado do porto TIMEP.	LOW após 6 segundos	HIGH após 6 segundos	Desativado após 6 segundos	Encontra-se desligado após 6 segundos.

6.1.5 Estado das baterias

Como se pode ver pela figura 6.20, existe um divisor resistivo que está ligado à entrada do fio que controla o estado do controlador do motor elétrico, que possui a mesma tensão que as baterias.

Realizou-se um divisor resistivo, de forma a atenuar a diferença de potencial presente nas baterias, como se pode verificar na próxima expressão matemática:

$$V_{DivisorResistivo} = \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 120k\Omega} \times 65V = 5V \quad (6.14)$$

Os 65V definem a tensão máxima das baterias registada pelo multímetro.

A saída do divisor resistivo passa ainda por um *buffer*, para melhorar a leitura que se efetua no porto BATTERY do Arduino Leonardo.

6.2 Interface do utilizador

6.2.1 Micro-controlador

Inicialmente existia um sistema controlado por dois Arduinos Leonardos. No entanto, alterou-se o micro-controlador que tem contacto direto com o utilizador por um Raspberry Pi 3. Para além de possuir mais ferramentas para a criação de uma interface gráfica, ainda oferece a ligação com o utilizador através de um cabo *Ethernet*.

As características mais relevantes deste micro-controlador para este sistema são:



Figura 6.26: Raspberry Pi 3.

- CPU: Quad Core 1.2GHZ Broadcom BCM2837
- RAM: 1 GB RAM
- GPIO: 40-pin extend GPIO
- Portas: 4 x USB 2.0 , Ethernet, HDMI
- *Bluetooth*: Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy

6.2.2 Interface gráfica

A interface gráfica é fundamental para o utilizador selecionar e visualizar o estado do veículo. Esta encontra-se disponível numa página WEB através da tecnologia *back-end Node.js*. Esta é uma plataforma construída sobre o motor JavaScript do Google Chrome, que permite aos utilizadores criarem aplicações WEB de uma forma rápida e escalável.

Utilizaram-se as seguintes bibliotecas que pertencem ao *Nodejs*:

- **socket.io**: produz a comunicação bi-direcional entre servidor e cliente por WEB *sockets* através de eventos.
- **express.js**: É uma *framework* para aplicações WEB do *Node.js* simples e flexível, que fornece um conjunto de recursos robustos para aplicativos WEB e móveis.

Servidor-Cliente

O servidor está implementado no Raspberry Pi e o cliente é um computador/portátil que está ligado diretamente por cabo *Ethernet*.

Estes dois elementos necessitam de estar na mesma rede para que haja comunicação, logo, estes possuem os seguintes endereços IP:

Elemento	Endereço IP(TCP/IPV4)
Raspberry Pi	192.168.137.50
Cliente(Computador)	192.168.137.1

Após efetuar a configuração e executar o programa, é criado um servidor (*back-end*) por parte do Raspberry Pi, com ajuda da *framework Express* na porta 3000, pelo que o cliente consegue ter acesso ao mesmo se colocar no seu navegador WEB o seguinte url: 192.168.137.50:3000.

O servidor configura e comunica com veículo através do módulo RF e com o cliente por *web sockets* quando acontecem os seguintes eventos:

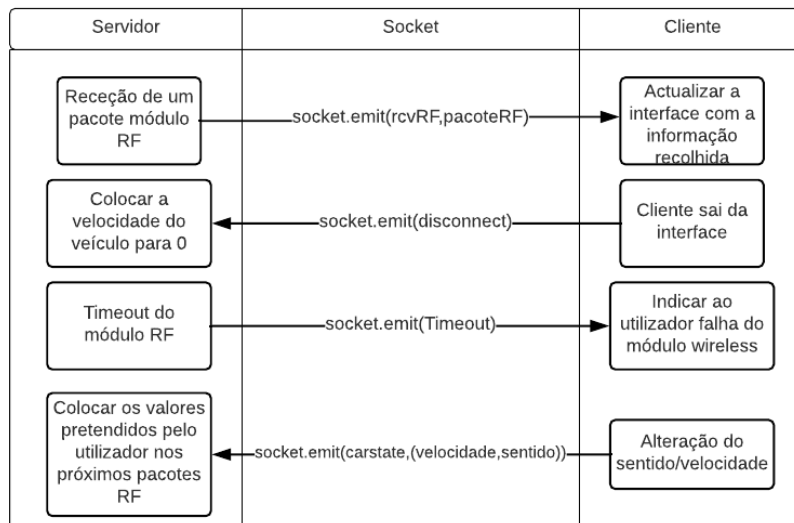


Figura 6.27: Comunicação por web sockets entre servidor e cliente.

O *front-end* tem como base as tecnologias HTML, JavaScript e CSS que tornaram possível construir a seguinte interface gráfica:



Figura 6.28: Interface gráfica.

Esta interface possui uma barra lateral esquerda, que contém vários botões que permitem ao utilizador seleccionar a velocidade e o sentido do veículo.

Na parte central da página WEB está representado o circuito que o veículo executa no terraço do Instituto de Telecomunicações. Para este ser o mais realista possível foi necessário realizar os seguintes passos:

1. Com os dados do sistema de GPS-RTK que estão explícitos no capítulo 7.1.2, foi calculado o ponto central que representa o centro do circuito.

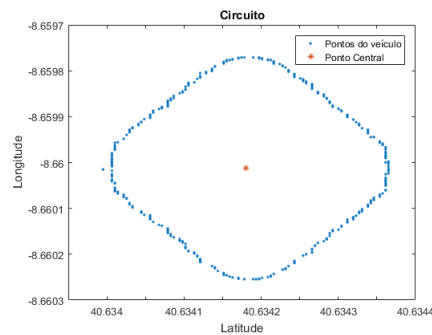


Figura 6.29: Trajetória do veículo e o ponto central.

2. Efetuou-se a diferença entre as coordenadas do veículo e o ponto central. Com isto, é possível converter de coordenadas cartesianas para coordenadas polares.

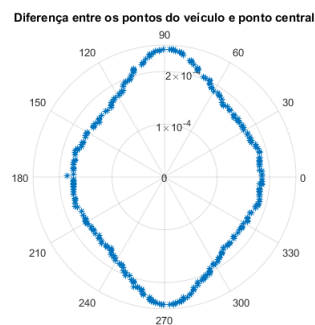


Figura 6.30: Diferença gerada entre os pontos do veículo com o ponto central.

3. Com ajuda da ferramenta Matlab realizou-se uma interpolação SmoothingSpline.

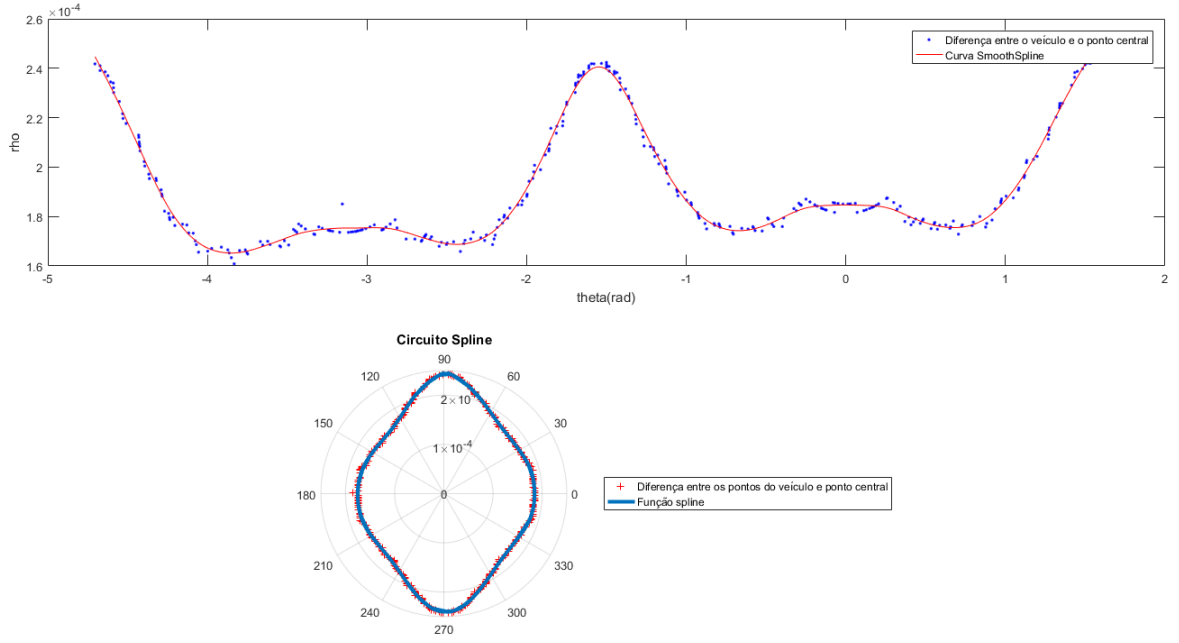


Figura 6.31: Aproximação *spline*.

4. Incrementou-se a escala do circuito para colocar na *web page* numa janela que possui as dimensões 800×800 px.

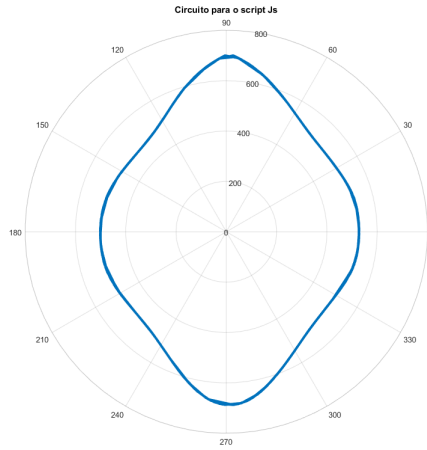


Figura 6.32: Gerar pontos para o *front-end*.

O cursor indica a posição em tempo real do veículo. Este desloca-se ao longo do desenho do circuito de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$\theta = \text{atan2}(RF_{Longitude} - PC_{Longitude}, RF_{Latitude} - PC_{Latitude}) \quad (6.15)$$

Onde a variável **RF** representa as coordenadas do veículo que chegam do módulo RF, e **PC** indica as coordenadas do ponto central.

Este ângulo calculado percorre um array que possui todos os pontos do circuito até encontrar o ângulo mais próximo.

Num caso futuro, caso seja necessário alterar a posição da base, basta mudar as coordenadas do ponto central para registrar corretamente a posição do veículo, tal como se pode verificar nos resultados 7.1.3.

Dentro do desenho do circuito é apresentada a informação instantânea do veículo relativamente à velocidade, tensão das baterias, estado do sistema de posição e o estado da comunicação RF entre o servidor e o veículo.

6.3 Módulo *wireless*

Antes de se proceder à compra de um módulo *wireless* foi necessário realizar um estudo do ruído provocado pelo motor elétrico implementado no veículo, para obter a garantia que não existia interferência com o módulo de comunicação. Os módulos *wireless* em vista pertencem à gama Sub-GHz, portanto através de um analisador de espectro e uma antena apropriada, realizou-se um varrimento de frequência dos 300 MHz até 1 GHz. Este estudo foi concretizado numa sala não controlada, o que proporcionou o registo de ruído de outros objetos eletrónicos. Para saber se o motor elétrico produz qualquer tipo de ruído prejudicial, foram realizados dois testes. O primeiro teste consistiu em colocar o motor elétrico com diferentes velocidades e posicionar a antena em várias direções.

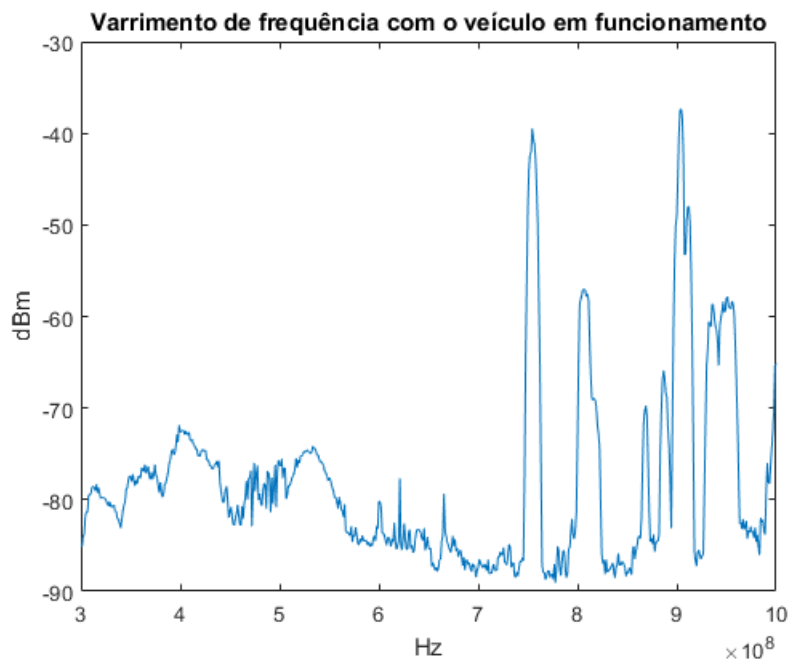


Figura 6.33: Varrimento de frequência com veículo em funcionamento.

O segundo teste representa o varrimento de frequência, quando o motor se encontrava totalmente desligado.

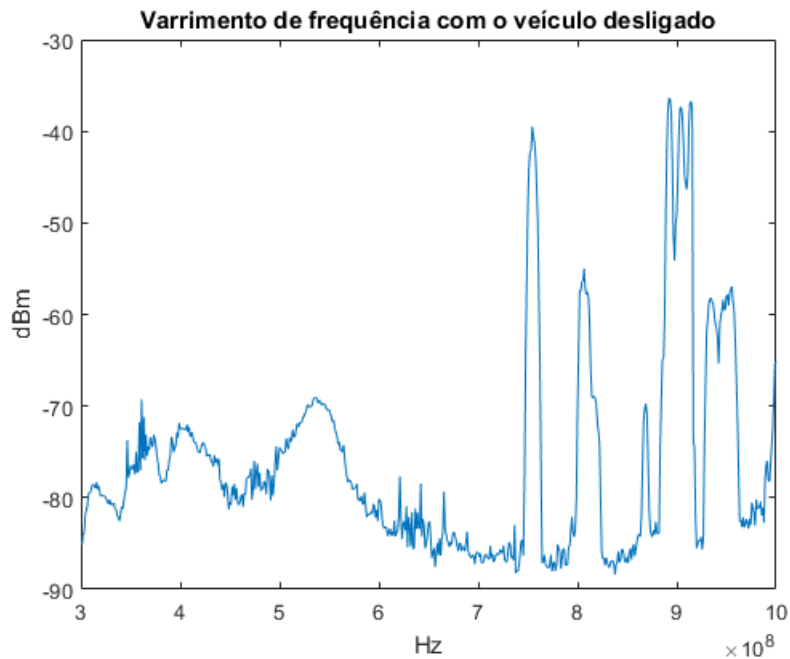


Figura 6.34: Varrimento de frequência com veículo desligado.

A seguinte figura demonstra a diferença entre as duas experiências efetuadas.

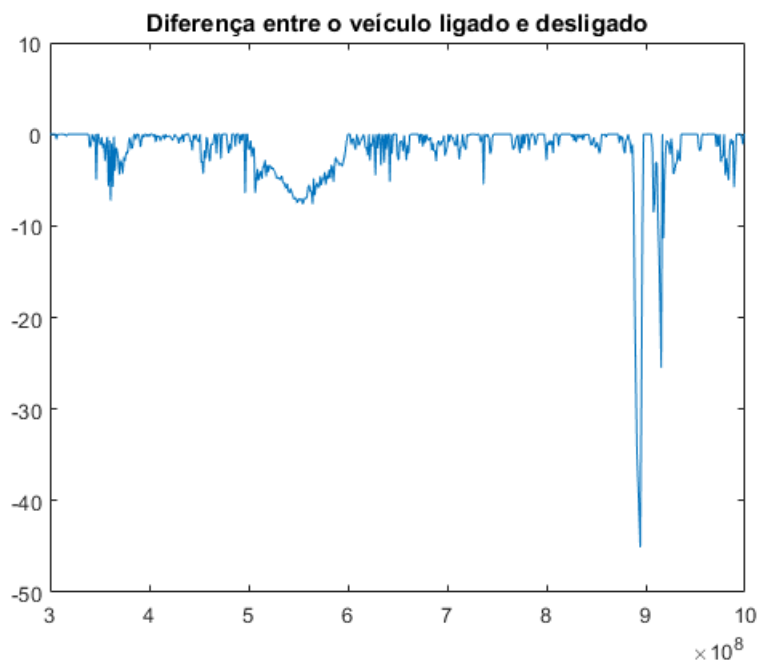


Figura 6.35: Diferença com o veículo em funcionamento e desligado.

Era expectável o registos de picos entre os 890MHz e os 960MHz, como se observa no gráfico anterior, pois nesta sub-gama é onde se localizam as bandas ocupadas por aplicações GSM

(*Global System for Mobile Communications*). Portanto, a escolha da frequência do módulo *wireless* recaiu para a frequência de 433MHz, tendo como base estes últimos três gráficos, visto que não se registou qualquer tipo de ruído prejudicial por parte do motor elétrico, e existe um menor risco de interferências de outras aplicações *wireless*.

Com ajuda da aplicação Google Earth, o telhado do Instituto de Telecomunicações é praticamente um quadrado com uma área 1332 m^2 , e possui alguns obstáculos que podem prejudicar a comunicação entre os módulos *wireless*. Com esta informação em mente, realizou-se um estudo no mercado que teve como resultado o módulo RFM69HCW. Este módulo, apesar de apresentar um custo reduzido, tem as características mais que necessárias para cobrir o terraço e efetuar uma comunicação eficiente.

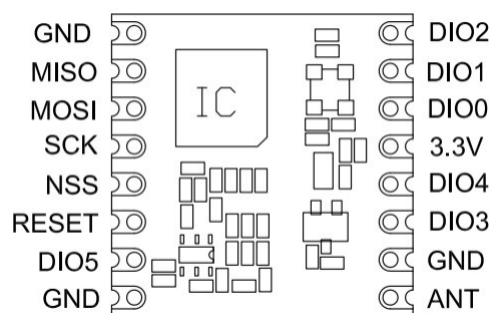


Figura 6.36: Diagrama do circuito integrado RFM69HCW.

As especificações do módulo RF69HCW são as seguintes:

- Comunicação: Half-duplex
- Interface: SPI
- Frequência: 433MHz
- +20dBm - 100mW Potência de Saída
- Sensibilidade: -120dBm @1.2kb/s
- Corrente modo Rx: 16mA
- FSK bit rate máximo: 300kb/s
- Modulações: FSK, GFSK,MSK,GMSK e OOK
- Reconhecimento de palavras de sincronização
- CRC-16, AES-128,66-byte FIFO
- Sensor de Temperatura

A próxima figura indica as ligações elétricas necessárias entre o Arduino Leonardo e o módulo *wireless*.

Endereço	Nome do Endereço	Valor	Observações
0x01	RegOpMode	0x04	Colocar Modo <i>StandBy</i> .
0x02	RegDataModul	0x00	Modulação FSK e comunicação efetua-se por pacotes.
0x03/0x04	RegBitRateMSB /RegBitRateLSB	0x02/0x04	$BitRate = \frac{FXOSC}{BitRate(15,0)}$
0x05/0x06	RegFdevMSB /RegFdevLSB	0x03/0x33	Desvio da frequência central que corresponde a duas fases características do sinal FSK. Neste caso é igual 35KHz. $Fdev = Fstep * Fdev(15,0)$
0x07/0x08/0x09	RegFrfrMSB /RegFrfrMID /RegFrfrLSB	0x6C /0x40 0x20	Colocação da frequência do módulo RF a 433 MHz.
0x11	RegPaLevel	0x7F	Seleção dos amplificadores de potência e colocar a potência de saída a 13dBm.
0x58	SensitivityBoost	0x2D	Colocar a máxima sensibilidade do sensor.
0x18	RegLna	0x08	Impedância de entrada igual a 50Ω .
0x19	RxBwExp	0x42	A largura de banda do canal recepção é igual a 125 kHz.
0x25	RegDioMapping2	0x07	Desligar o relógio externo.
0x2e	RegSyncConfig	0x88	Cada pacote enviado tem duas palavras estáticas que ajudam a sincronização entre módulos.
0x2f	RegSyncValue1	100	Valor da primeira palavra sincronização.
0x30	RegSyncValue	0x2D	Valor da segunda palavra de sincronização.
0x37	RegPacketConfig1	0x90	Os pacotes enviados entre os módulos têm diferentes tamanhos. Detecção de erros CRC.
0x3D	RegPacketcongig2	0x02	Pacotes enviados não têm qualquer tipo encriptação.

Tabela 6.8: Configuração do módulo RFM69HCW.

Os restantes registos estão configurados com os valores já predefinidos pelo fabricante.

6.3.2 Comunicação

Os módulos realizam uma comunicação *half-duplex*, portanto estes precisam de alternar o seu estado entre o transmissor e o recetor.

Módulo conectado ao servidor

Este envia pacotes a uma frequência de 3Hz com as preferências do utilizador de acordo com a seguinte trama:

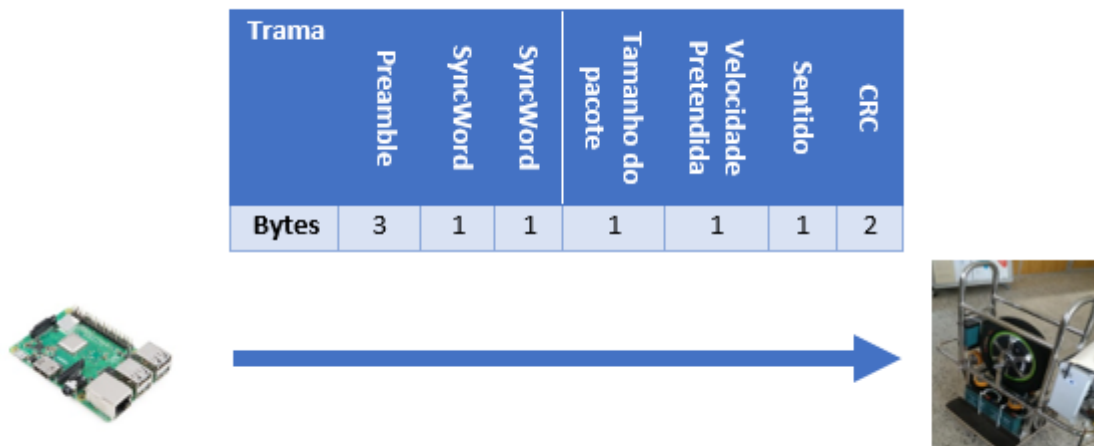


Figura 6.38: Trama do utilizador para o servidor.

Entre o envio de pacotes, este módulo fica à espera de receber um pacote com o estado atual do veículo. Se em 50 pacotes enviados, este não receber um pacote, o utilizador recebe a informação que o link entre estes dois módulos RF pode não estar estabelecido.

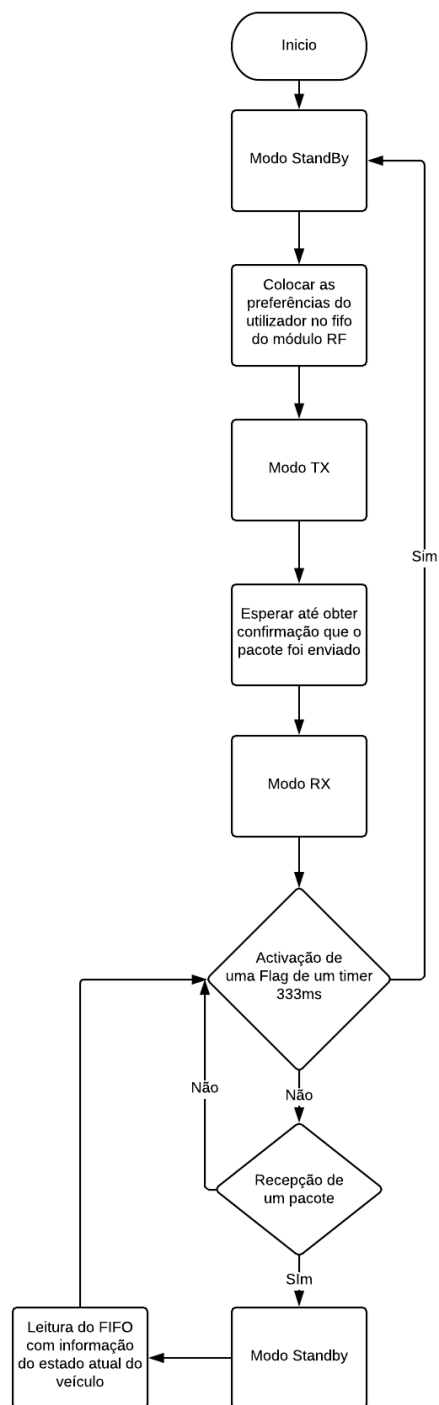


Figura 6.39: Diagrama do módulo RF acoplado ao utilizador.

Módulo acoplado ao veículo

Este fica, maior parte do tempo, à espera de receber um pacote com as preferências do utilizador. Após a receção de um pacote, são colocadas em duas *queues* os valores relativos à velocidade e sentido pretendidos pelo utilizador. Logo após estes procedimentos, este envia um pacote (figura 6.40) com o estado atual do veículo.

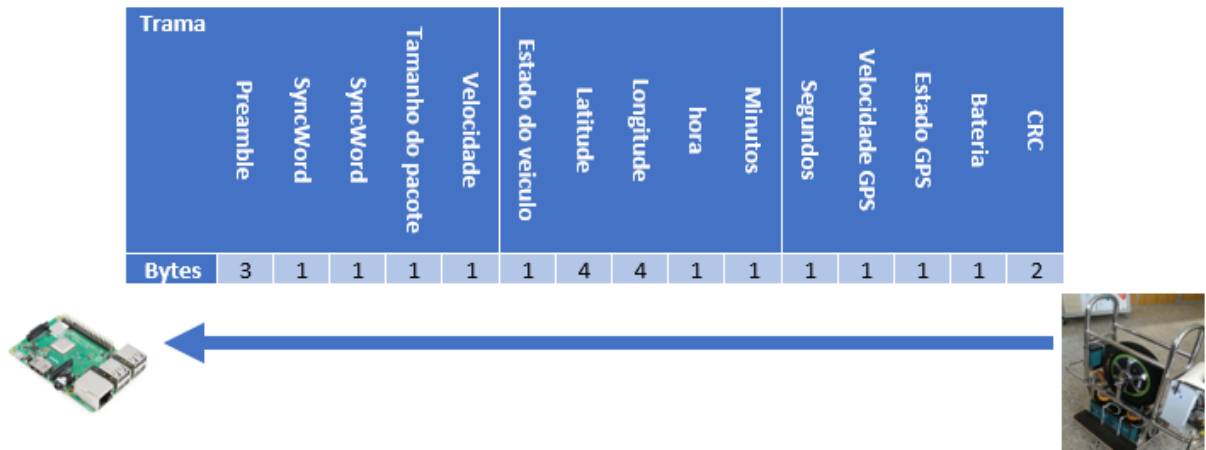


Figura 6.40: Estrutura do pacote do veículo para o servidor.

Existe um *timer* com período de 1s que avalia o estado das *queues*. Aqui é efetuada a média dos valores recolhidos das *queues*, para aplicar no veículo. Caso as *queues* não tenham elementos durante esta janela temporal, irá existir uma alteração na máquina de estados para o estado de repouso.

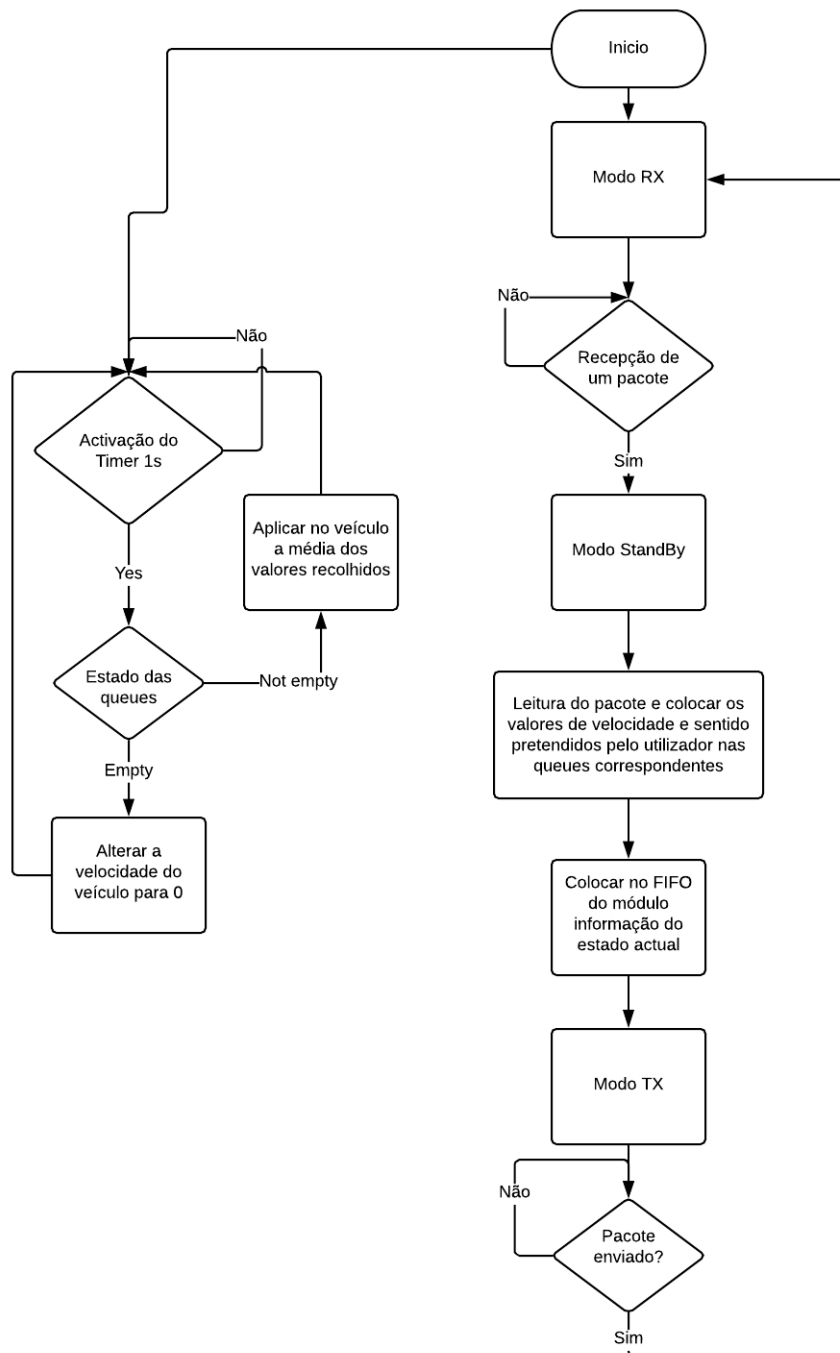


Figura 6.41: Diagrama de comunicação por parte do módulo RF embutido no veículo.

A próxima imagem, identifica a transição de estados dos módulos RF e como é efetuada a troca de pacotes.

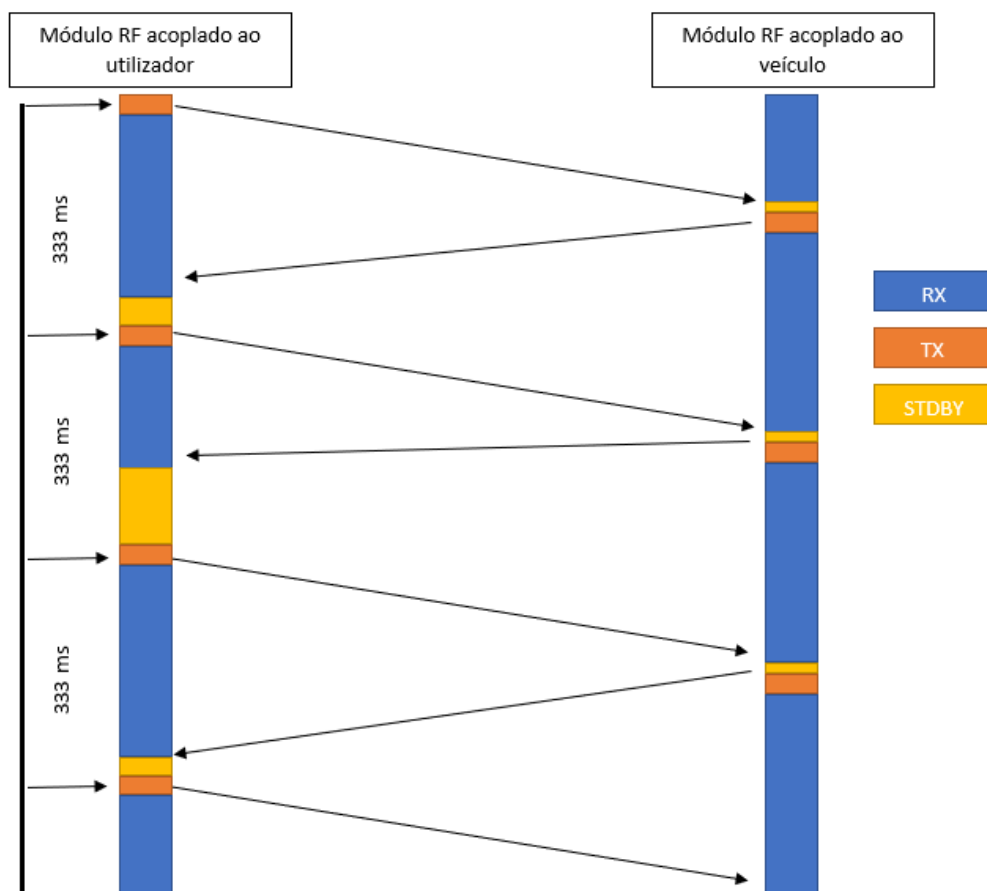


Figura 6.42: Estados e comunicação por parte dos módulos RF. RX - Recepção; TX - Transmissão; STDBY - *StandBy*.

6.4 Sistema de posição

Para o utilizador observar em tempo real a posição do veículo, utilizou-se o sistema de GPS-RTK.

O módulo inserido foi um recetor NS-HP-GL: GPS/GLONASS do fabricante NavSpark, porque foi o módulo mais barato que se encontrou no mercado.



Figura 6.43: Módulo GPS-RTK: NS-HP-GL-10.

- Precisão da posição: DGPS: <1m , RTK: cm.
- GPS L1 + GLONASS L1 + QZSS + SBAS L1 C/A code, 167 canais
- Potência: 230mW
- Protocolos: NMEA0183 e RTCM 3.1
- Precisão da velocidade: 0.1m/s
- Sensibilidade: -160dBm
- Update Rate: 1/2/4/5/8/10Hz

O fabricante fornece um *software open-source* denominado GNSS Viewer, que permite configurar e visualizar o estado do módulo GPS-RTK em tempo real através de um módulo UART-USB.

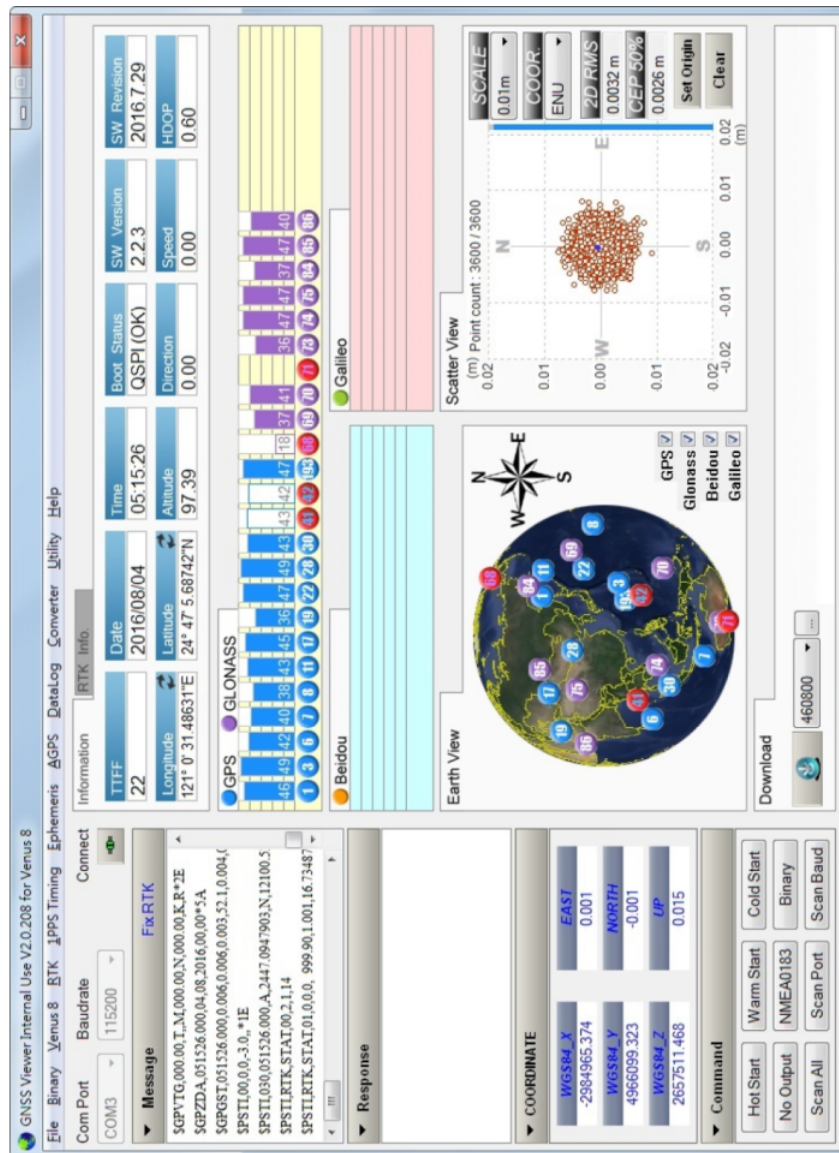


Figura 6.44: Software GNSS Viewer.

Para que este sistema funcione é necessário replicar o sistema da figura 6.45, e um dos elementos fundamentais é a comunicação entre a base e o módulo associado ao veículo. Esta é assegurada por um módulo *Bluetooth* RN-41, sendo este produzido pela empresa Microchip. O módulo caracteriza-se por:

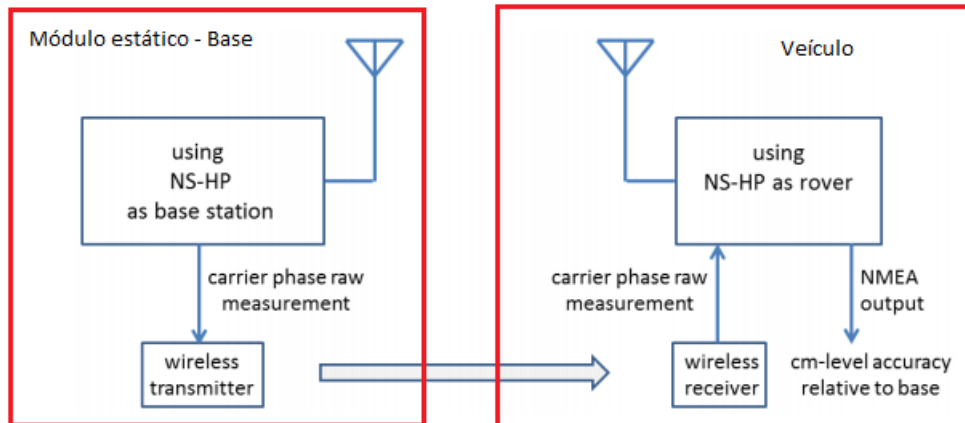


Figura 6.45: Estrutura do sistema RTK.



Figura 6.46: Módulo Bluetooth - RN-41.

- *Baudrate*: 1.200bps - 921 Kbps
- *Bluetooth* classe 1, o que promove um alcance de 100m.
- Frequência: 2.402 - 2.480Mhz
- Sensibilidade de recepção: -80dBm
- Alimentação: 3.3V
- UART (SPP ou HCI) e USB (HCI).

A configuração dos módulos *Bluetooth* efetuou-se por via UART, através dos comandos explícitos no *datasheet* do mesmo. Tendo isto em conta, apenas as seguintes características foram alteradas:

- *Baudrate*: 57600bps, visto que é exigido pelo módulo RTK que a comunicação se realize apenas a esta velocidade.
- Potência de transmissão: 12dB
- O módulo *Bluetooth* associado à base tem como função *slave*, enquanto o módulo do *Rover* possui o modo *Auto-connect Master Mode*. Assim, sempre que se liga o veículo, o *link* entre estes dois módulos *Bluetooth* realiza-se automaticamente.

6.4.1 Módulo RTK embutido no veículo

Este módulo RTK possui as seguintes ligações para o seu funcionamento:

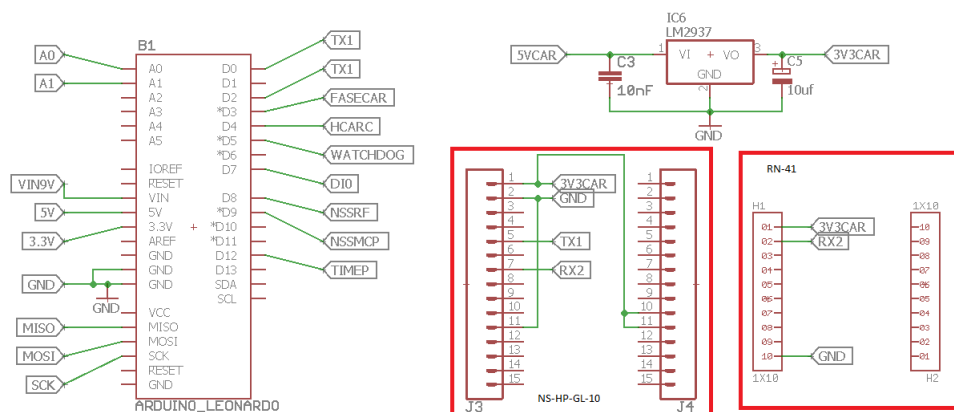


Figura 6.47: Esquema do sistema GPS-RTK embutido no veículo.

A alimentação é estabelecida por um regulador de tensão 3V3, promovendo o bom funcionamento dos módulos presentes.

O módulo *Bluetooth* RN-41 apenas possui a função de receber as mensagens RTCM 3.0 provenientes da base, que são imediatamente enviadas para o módulo RTK pela ligação RX2.

O módulo RTK possui uma porta série, que está identificada na figura 6.47 como TX1. Esta porta envia *strings* de dados processados pelo recetor RTK (velocidade, posição, altitude, etc) sob o protocolo denominado NMEA-183.

Este sistema foi configurado com o *software* GNSS Viewer para enviar as seguintes *strings*:

- GGA (*Global Positioning System Fix Data*) a uma frequência de 1Hz.

\$GPGGA,202434.000,2447.0936188,N,12100.5253729,E,4,22,0.6,96.186,M,19.600,M,,0000*65<CR><LF>

Field	Name	Example	Description
1	UTC Time	202434.000	UTC of position in hhmmss.sss format, (000000.000 ~ 235959.999)
2	Latitude	2447.0936188	Latitude in ddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
3	N/S Indicator	N	Latitude hemisphere indicator, 'N' = North, 'S' = South
4	Longitude	12100.5253729	Longitude in dddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
5	E/W Indicator	E	Longitude hemisphere indicator, 'E' = East, 'W' = West
6	GPS quality indicator	4	GPS quality indicator 0: position fix unavailable 1: valid position fix, SPS mode 2: valid position fix, differential GPS mode 3: GPS PPS Mode, fix valid 4: Real Time Kinematic. System used in RTK mode with fixed integers 5: Float RTK. Satellite system used in RTK mode., floating integers 6: Estimated (dead reckoning) Mode
7	Satellites Used	22	Number of satellites in use, (00 ~ 28)
8	HDOP	0.6	Horizontal dilution of precision, (0.0 ~ 99.9)
9	Altitude	96.186	mean sea level (geoid), (-9999.9 ~ 17999.9)
10	Geoidal Separation	19.600	Geoidal separation in meters
11	Age of Differential GPS data		Age of Differential GPS data NULL when DGPS not used
12	DGPS Station ID	0000	Differential reference station ID, 0000 ~ 1023
13	Checksum	65	

Figura 6.48: Constituição da mensagem GGA.

- RMC (*Recommended Minimum Specific GNSS Data*) a uma frequência de 5Hz.

\$GPRMC,075400.000,A,2447.0862197,N,12100.5222844,E,000.0,000.0,180915,,,R*74<CR><LF>

Field	Name	Example	Description
1	UTC time	075400.000	UTC time in hhmmss.sss format (000000.00 ~ 235959.999)
2	Status	A	Status 'V' = Navigation receiver warning 'A' = Data Valid
3	Latitude	2447.0862197	Latitude in ddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
4	N/S indicator	N	Latitude hemisphere indicator 'N' = North 'S' = South
5	Longitude	12100.5222844	Longitude in dddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
6	E/W Indicator	E	Longitude hemisphere indicator 'E' = East 'W' = West
7	Speed over ground	000.0	Speed over ground in knots (000.0 ~ 999.9)
8	Course over ground	000.0	Course over ground in degrees (000.0 ~ 359.9)
9	UTC Date	180915	UTC date of position fix, ddmmyy format
10	Mode indicator	R	Mode indicator 'N' = Data not valid 'A' = Autonomous mode 'D' = Differential mode 'E' = Estimated (dead reckoning) mode 'F' = Float RTK. Satellite system used in RTK mode, floating integers 'R' = Real Time Kinematic. System used in RTK mode with fixed integers
11	checksum	74	

Figura 6.49: Constituição da mensagem RMC.

- STI,030 (*Recommended Minimum 3D GNSS Data*) a uma frequência de 5Hz.

\$PSTI,030,044606.000,A,2447.0924110,N,12100.5227860,E,103.323,0.00,0.00,0.00,180915,R,1.2,4.2*02<CR><LF>

Field	Name	Example	Description
1	UTC time	044606.000	UTC time in hhmmss.sss format (000000.00 ~ 235959.999)
2	Status	A	Status 'V' = Navigation receiver warning 'A' = Data Valid
3	Latitude	2447.0924110	Latitude in dddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
4	N/S indicator	N	Latitude hemisphere indicator 'N' = North 'S' = South
5	Longitude	12100.5227860	Longitude in dddmm.mmmmmmm format Leading zeros transmitted
6	E/W Indicator	E	Longitude hemisphere indicator 'E' = East 'W' = West
7	Altitude	103.323	mean sea level (geoid), (-9999.999 ~ 17999.999)
8	East Velocity	0.00	'East' component of ENU velocity (m/s)
9	North Velocity	0.00	'North' component of ENU velocity (m/s)
10	Up Velocity	0.00	'Up' component of ENU velocity (m/s)
11	UTC Date	180915	UTC date of position fix, ddmmyy format
12	Mode indicator	R	Mode indicator 'N' = Data not valid 'A' = Autonomous mode 'D' = Differential mode 'E' = Estimated (dead reckoning) mode 'M' = Manual input mode 'S' = Simulator mode 'F' = Float RTK. Satellite system used in RTK mode, floating integers 'R' = Real Time Kinematic. System used in RTK mode with fixed integers
13	RTK Age	1.2	Age of differential
14	RTK Ratio	4.2	AR ratio factor for validation
15	Checksum	02	

Figura 6.50: Constituição da mensagem STI,030.

O micro-controlador possui duas entradas que estão diretamente ligadas à porta série do módulo RTK. A entrada D2 do Arduino Leonardo está configurada como interrupção sempre que existe uma mudança de estado (HIGH/LOW). A porta D0 corresponde à entrada RX do micro-controlador, que tem a função de ler 1 byte sempre que ocorre uma interrupção.

A informação obtida é processada por um módulo de *software* fornecido pelo fabricante. Este possui vários tipos de funções, que facilitam a extração dos dados pretendidos.

6.4.2 Módulo RTK - Base

As ligações entre o Raspberry Pi e o sistema RTK são as seguintes:

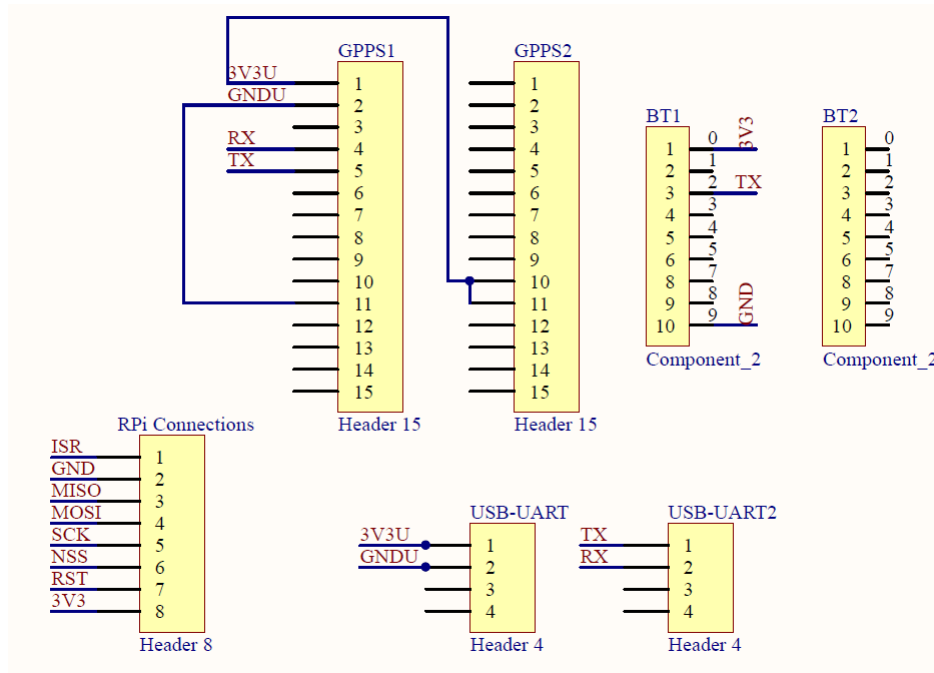


Figura 6.51: Esquema do sistema GPS-RTK com a função de base.

Neste caso, a fonte de alimentação para o módulo GPS-RTK é fornecida por um módulo UART-USB, pois torna-se mais fácil de aceder ao módulo GPS caso seja necessário mudar a posição da base numa situação futura.

O módulo UART-USB veio juntamente com módulo GPS-RTK, sendo apresentado de seguida:

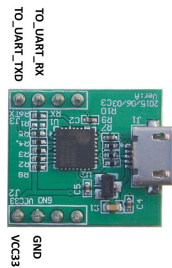


Figura 6.52: Módulo USB-UART.

O *header* da figura 6.51, denominado como RPi *Connections* liga-se diretamente ao micro-controlador Raspberry Pi.

Este módulo GPS-RTK tem o papel de base, e é responsável por enviar pela porta série TX mensagens RTCM, com as correções que são calculadas ao longo do tempo. O módulo *Bluetooth* RN-41 possui o papel de passar esta informação sem fios até ao módulo GPS-RTK embutido no veículo.

Definição da posição

A posição deste módulo encontra-se no terraço do Instituto Telecomunicações, em cima da cabine de acesso. Esta localização é justificada pelo facto de existirem menos obstáculos entre a comunicação efetuada pela base e o veículo. A próxima figura mostra um marcador que identifica o local preciso.

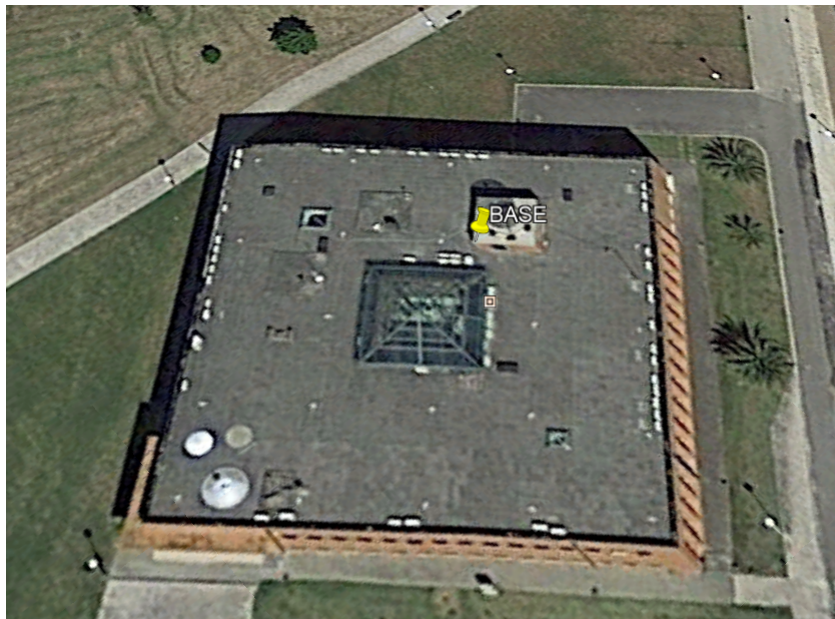


Figura 6.53: Posição do módulo GPS-RTK com a função de base.

Inicialmente este módulo descobria a sua própria posição ao longo de 5 minutos, antes de enviar mensagens de correção para o outro módulo. No entanto, este método apresentava resultados inconstantes relativos à sua própria posição, o que dificultava, por vezes, a convergência do sistema de posição para a casa dos centímetros.

Através da ajuda do Google Earth e de vários testes de convergência colocaram-se as coordenadas fixas $8^{\circ}39.602460' \text{ W}$, $40^{\circ}38.05494' \text{ N}$, neste módulo GPS. Desta forma, não existe grande variância nos valores da posição do veículo sempre que se liga o sistema.

Capítulo 7

Resultados

Esta secção tem como objetivo demonstrar o comportamento do veículo num conjunto de circunstâncias.

7.1 Acelerador/Leitura da velocidade a partir do filtro passa baixo

Esta experiência foi concebida ao incrementar a tensão na DAC 0.05V a cada dois segundos, e registar o comportamento da roda motriz no ar, ou seja, não existe a força de atrito imposta pelo circuito metálico.

O próximo gráfico indica o comportamento do veículo à medida que se incrementa a tensão no acelerador.

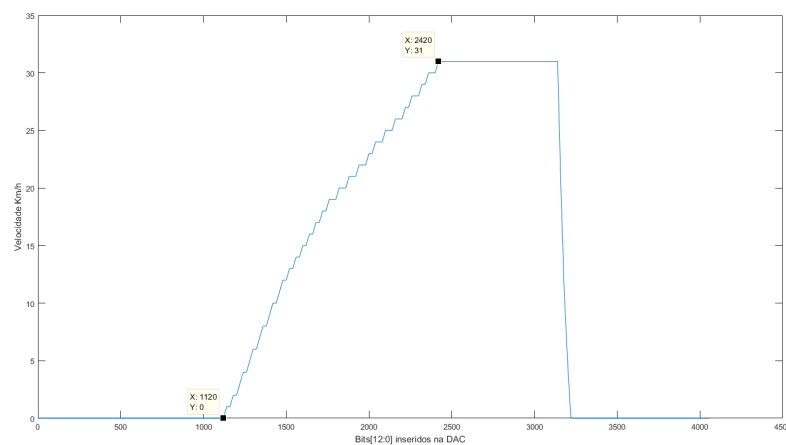


Figura 7.1: Velocidade em função dos bits colocados no módulo DAC.

Ao calcular a tensão de saída, de acordo com a expressão 6.1, obtemos o seguinte gráfico:

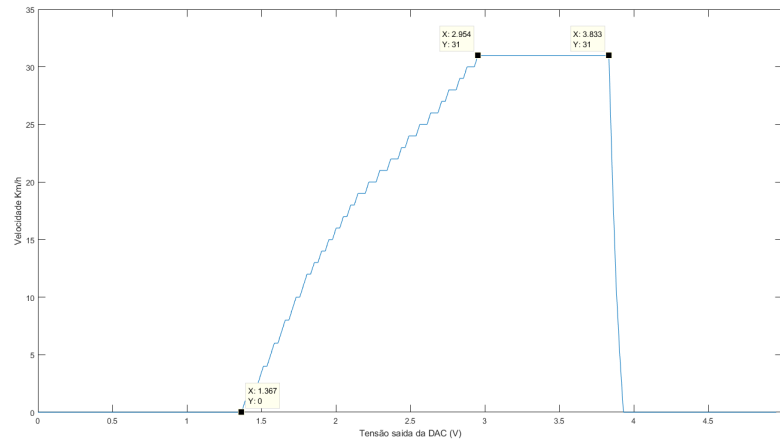


Figura 7.2: Velocidade em função tensão de saída do módulo DAC.

O controlador PID implementado, funciona na janela dos ponteiros registados na figura anterior, ou seja, a DAC apenas insere no controlador do veículo uma tensão de 1.367V até 2.954V. Consta-se também que o motor para de funcionar, quando a DAC fornece uma tensão superior a 3.833V.

7.1.1 Convergência do sistema de posição

De modo a verificar a precisão e a convergência deste sistema de posição, colocou-se o veículo sempre fixo na mesma posição, efetuando-se a recolha de valores ao longo do tempo.

As próximas figuras permitem verificar a convergência para o estado RTK.

- **Coordenadas do veículo:** registo das coordenadas do veículo ao longo do tempo.
- **Estado do sistema de posição:** indica o estado do módulo GPS-RTK ao longo do tempo. Apenas existem cinco estados:
 - 0: Dados Inválidos
 - 1: SPS (*Standart Positioning Service*)
 - 2: DGPS
 - 4: RTK
 - 5: Float RTK
- **Distância (m) entre o veículo e o ponto central:** este gráfico indica a distância em metros das coordenadas obtidas pelo sistema GPS-RTK em relação a um ponto central. O ponto central é a média das coordenadas obtidas após o sistema convergir para o estado RTK.
- **Distância (m) do ponto central após sistema convergir para o estado RTK:** este gráfico exhibe o comportamento do sistema GPS após convergir para o estado RTK.

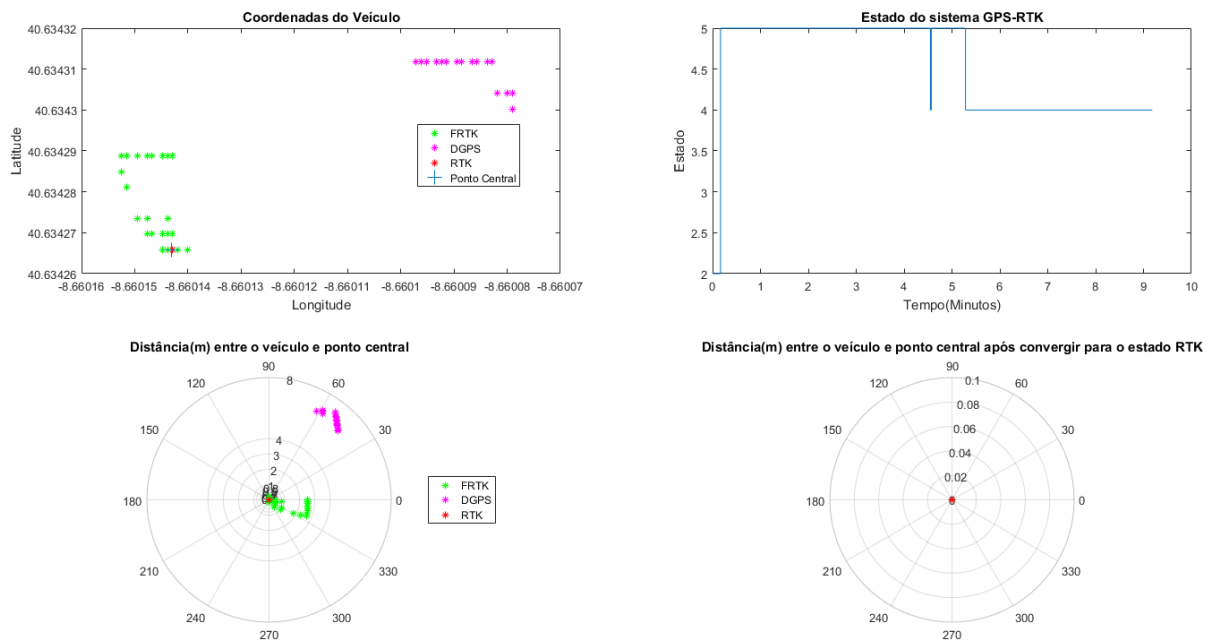


Figura 7.3: Resultados da primeira experiência.

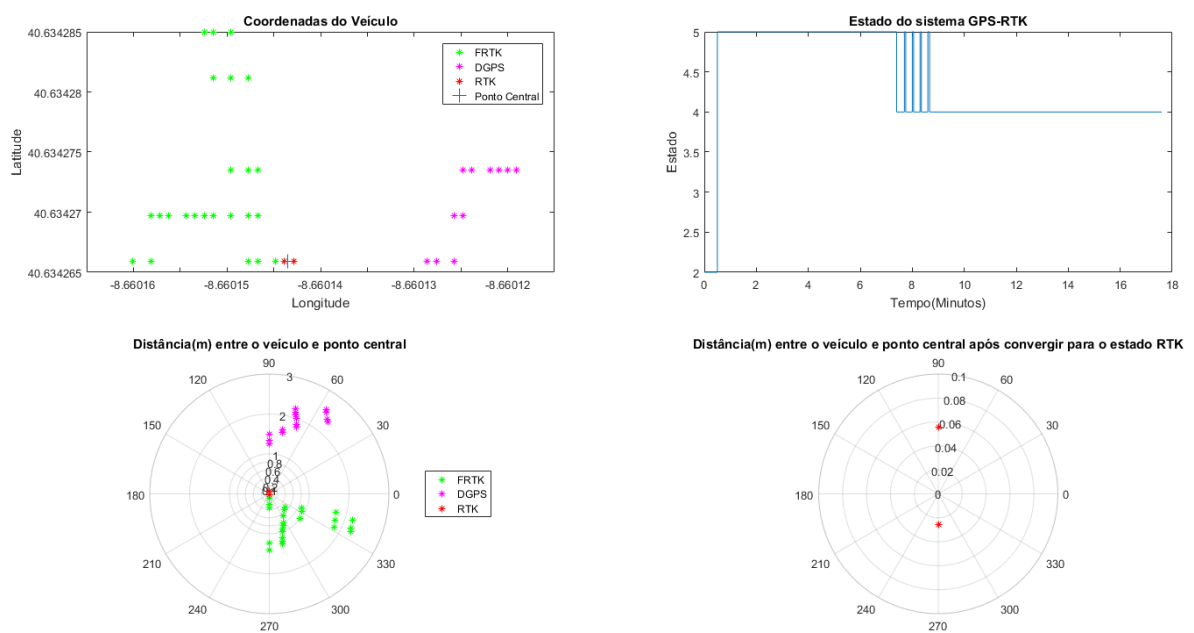


Figura 7.4: Resultados da segunda experiência.

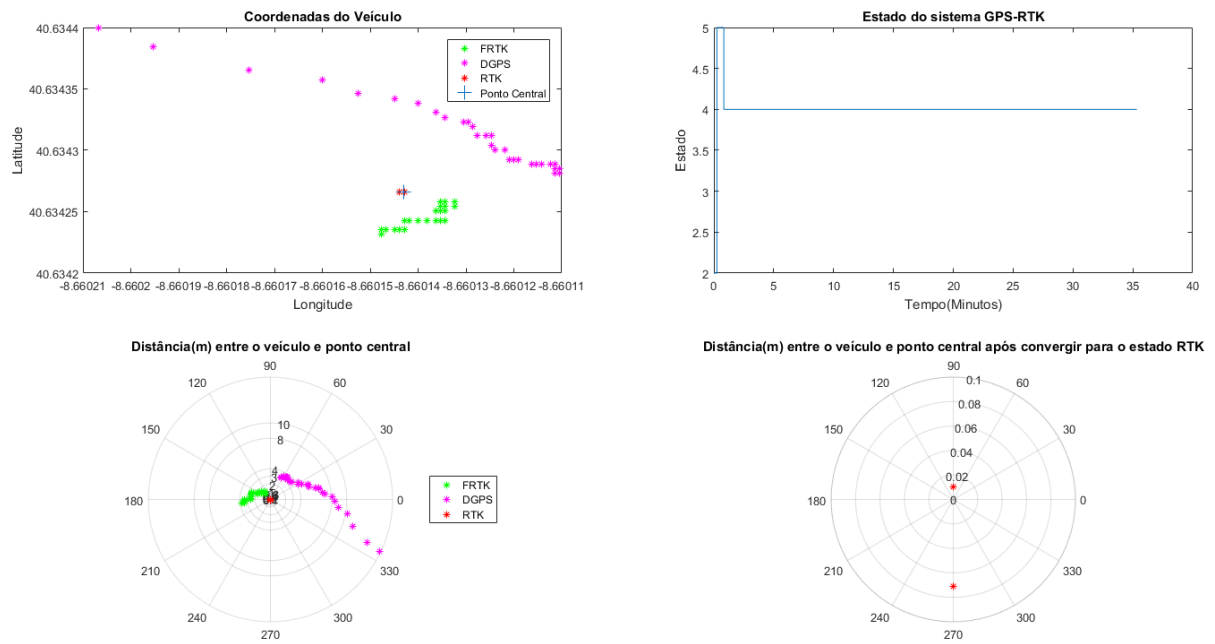


Figura 7.5: Resultados da terceira experiência.

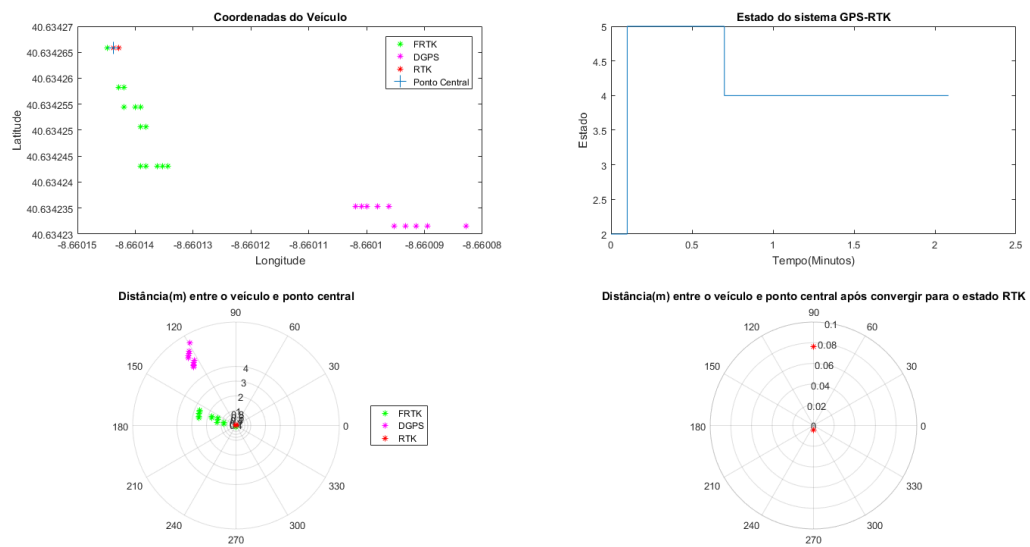


Figura 7.6: Resultados da quarta experiência.

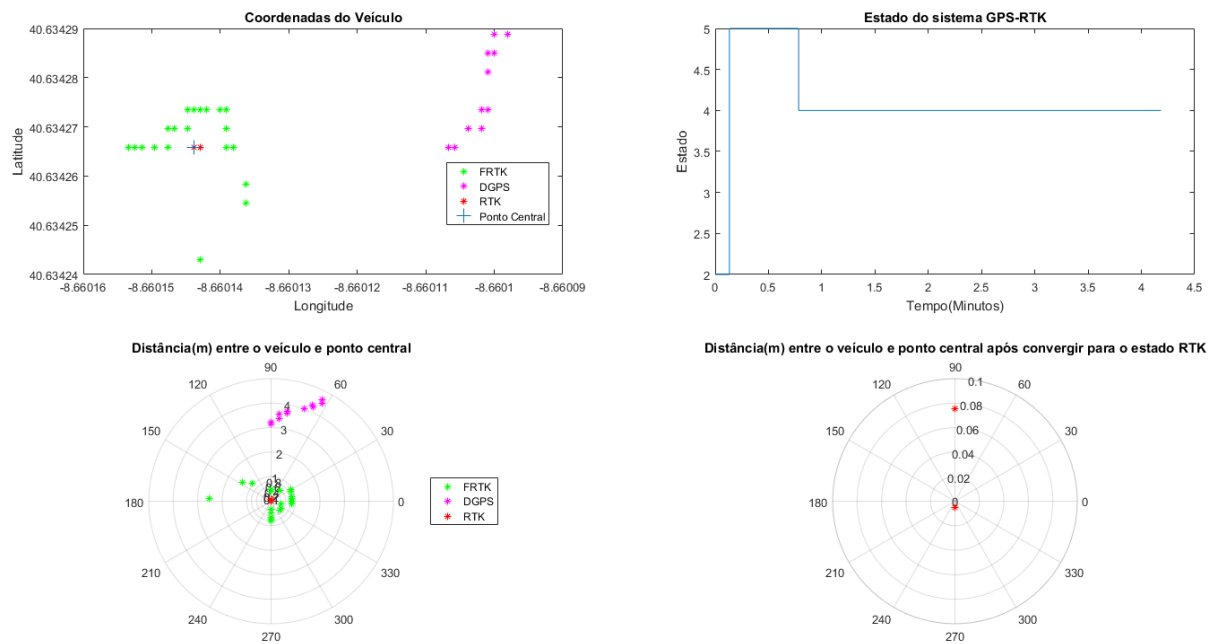


Figura 7.7: Resultados da quinta experiência.

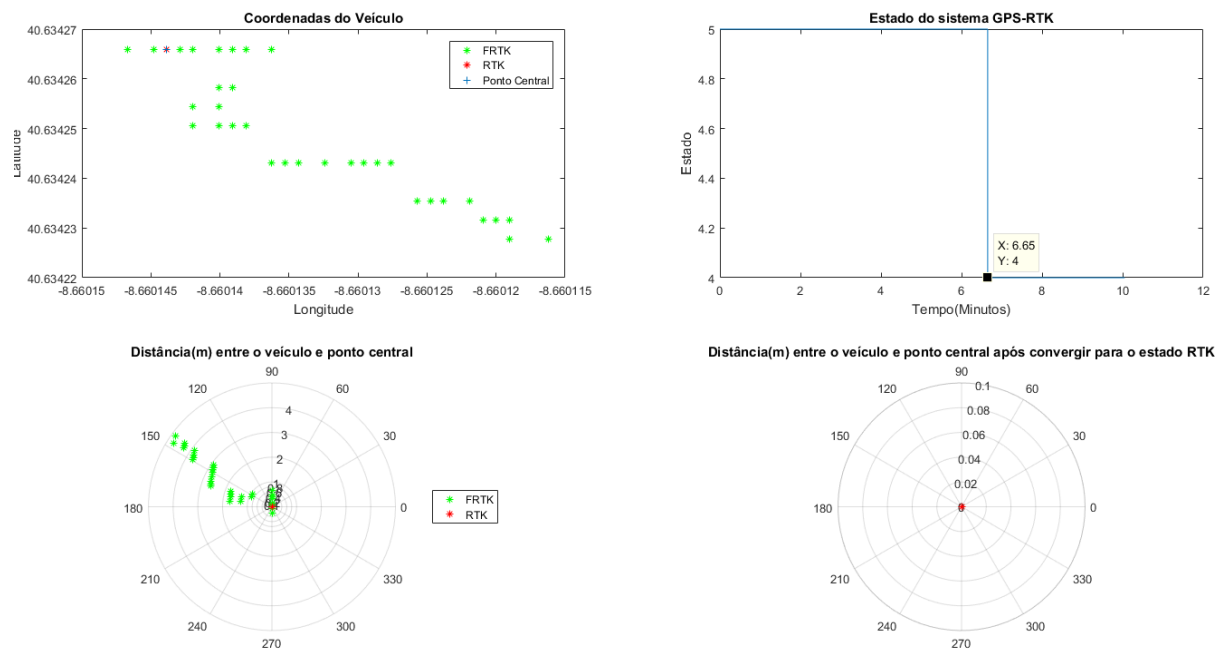


Figura 7.8: Resultados da sexta experiência.

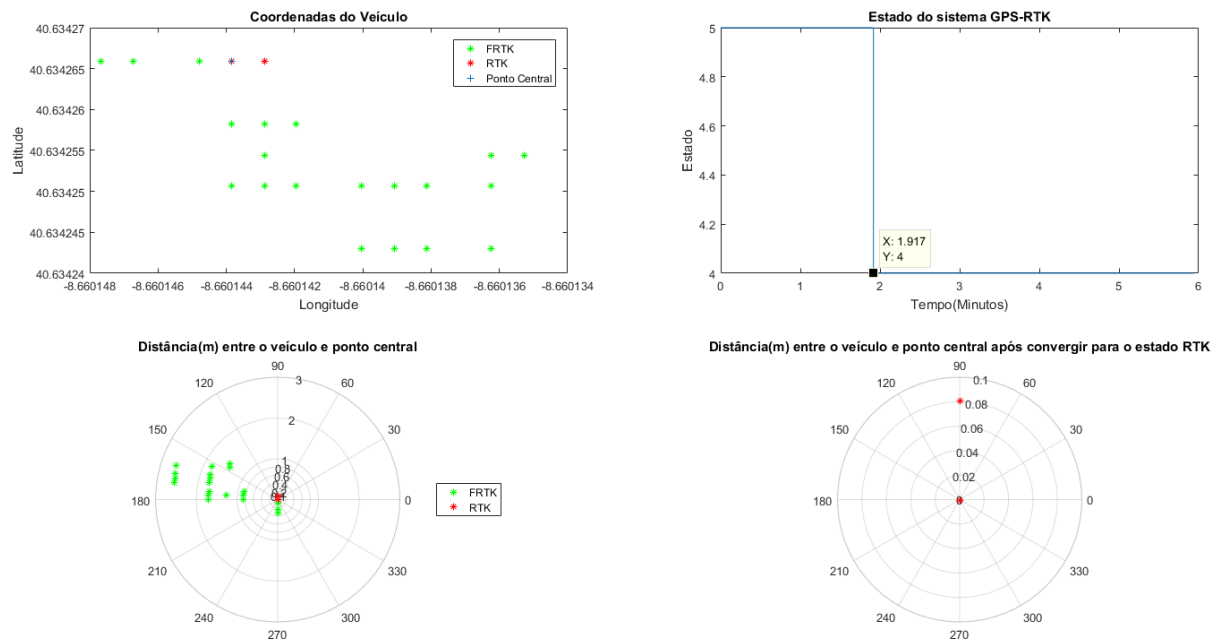


Figura 7.9: Resultados da oitava experiência.

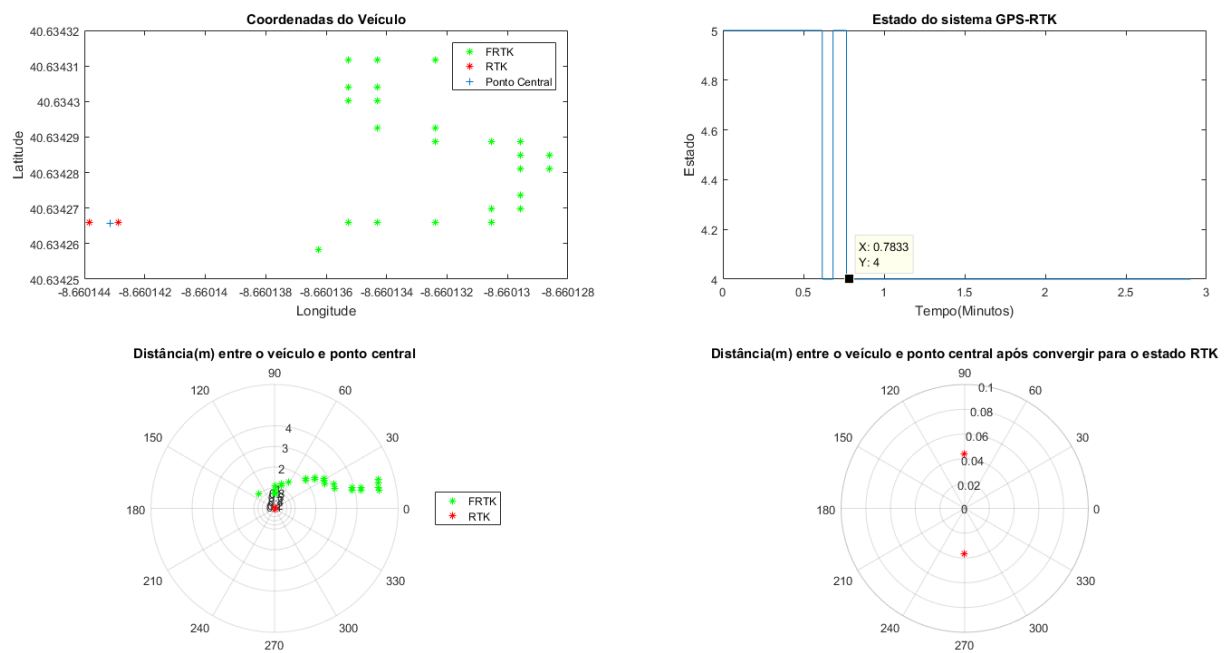


Figura 7.10: Resultados da nona experiência.

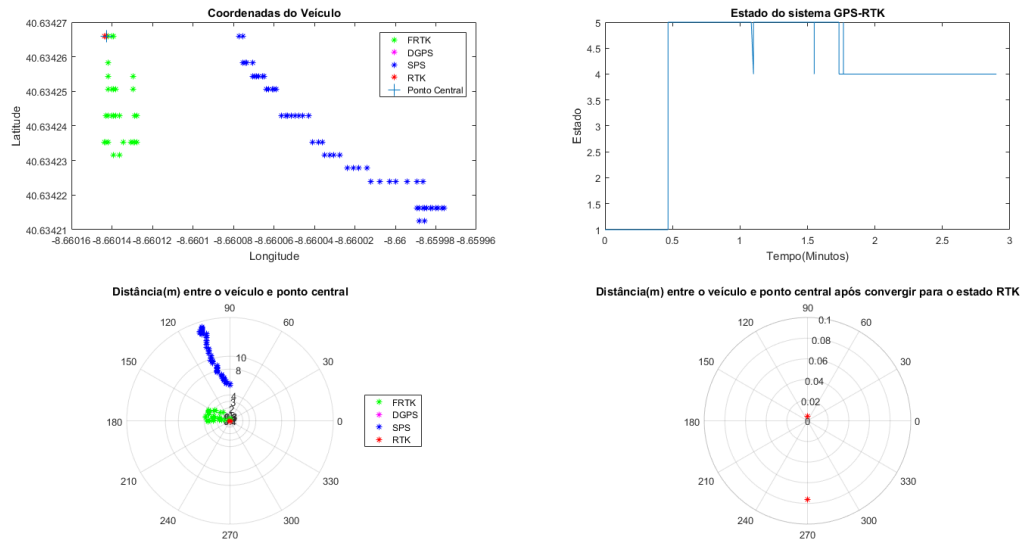


Figura 7.11: Resultados da décima experiência.

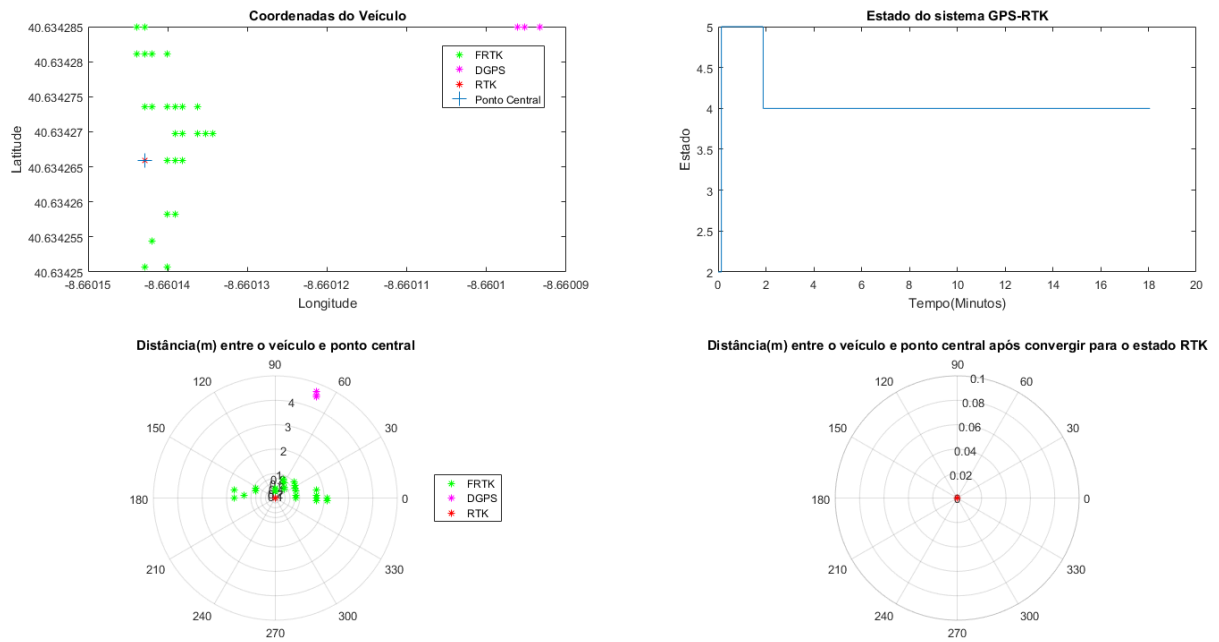


Figura 7.12: Resultados da décima primeira experiência.

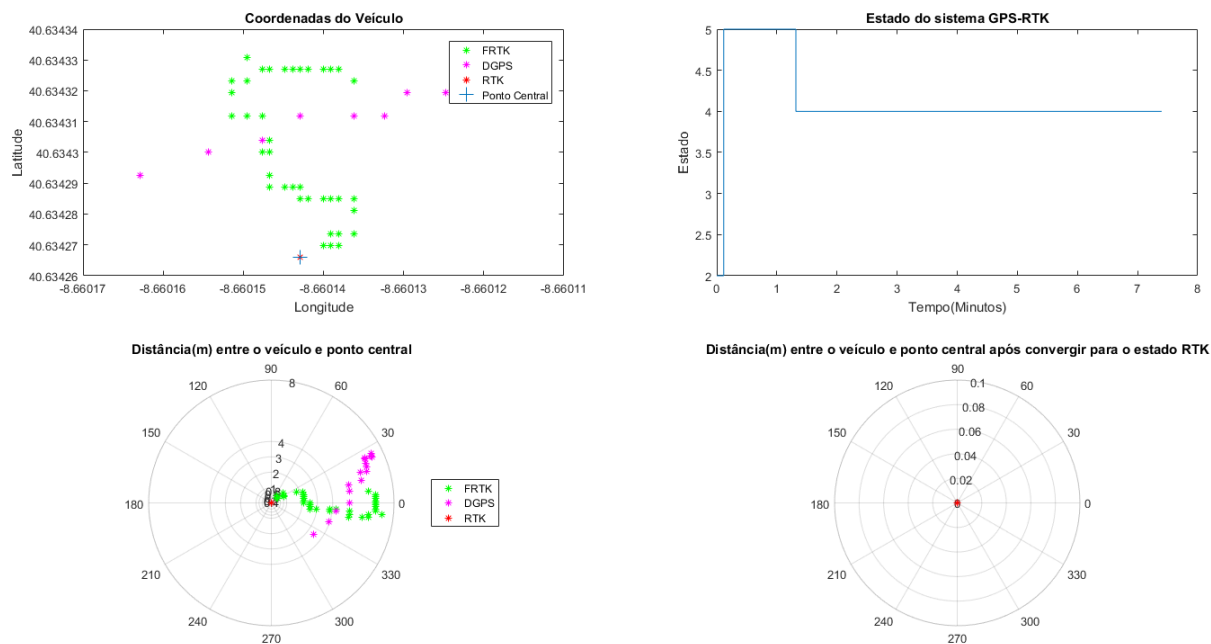


Figura 7.13: Resultados da décima segunda experiência.

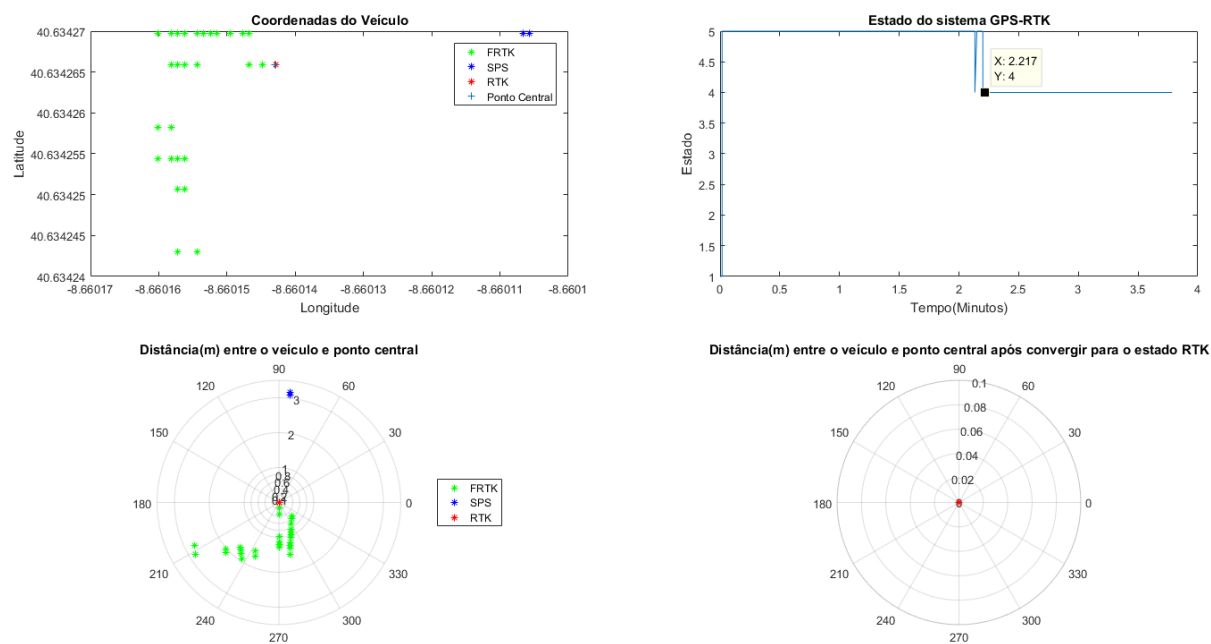


Figura 7.14: Resultados da décima terceira experiência.

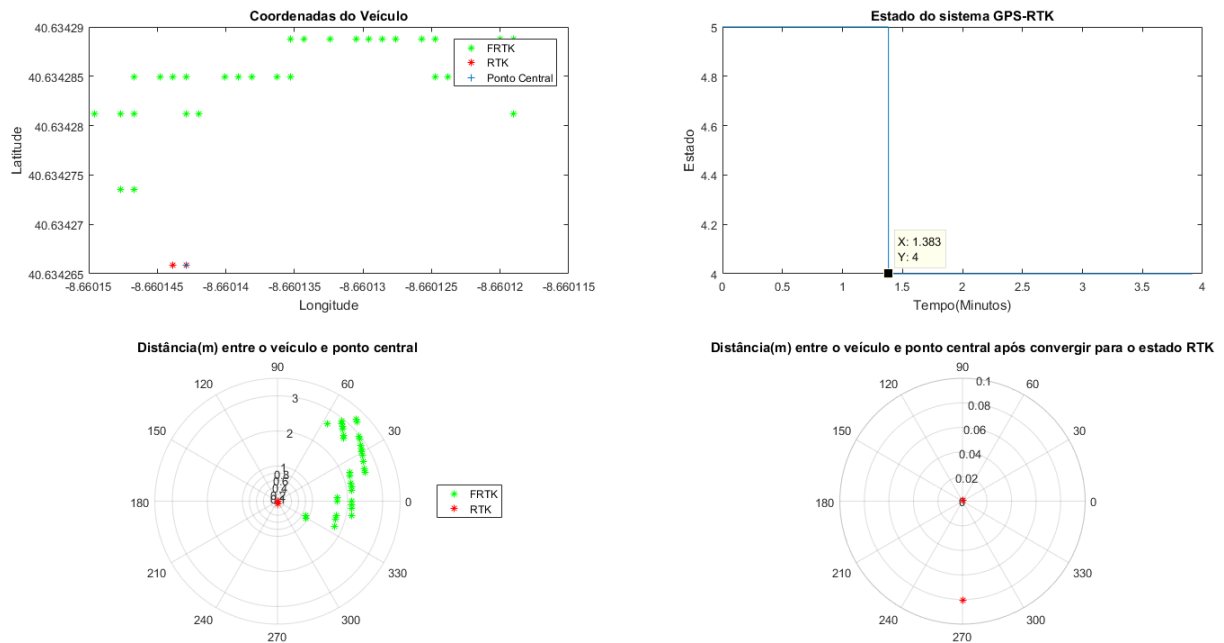


Figura 7.15: Resultados da décima quarta experiência.

Como se pode constatar, o tempo de convergência é variável, e por vezes, pode demorar mais do que cinco minutos para obter uma precisão de centímetros, pois depende como este deteta as primeiras coordenadas do veículo. Quando o sistema converge para o estado RTK as coordenadas do veículo apenas variam na casa dos centímetros.

A próxima imagem demonstra a junção de todos os pontos centrais obtidos nas figuras anteriores, e a diferença entre eles.

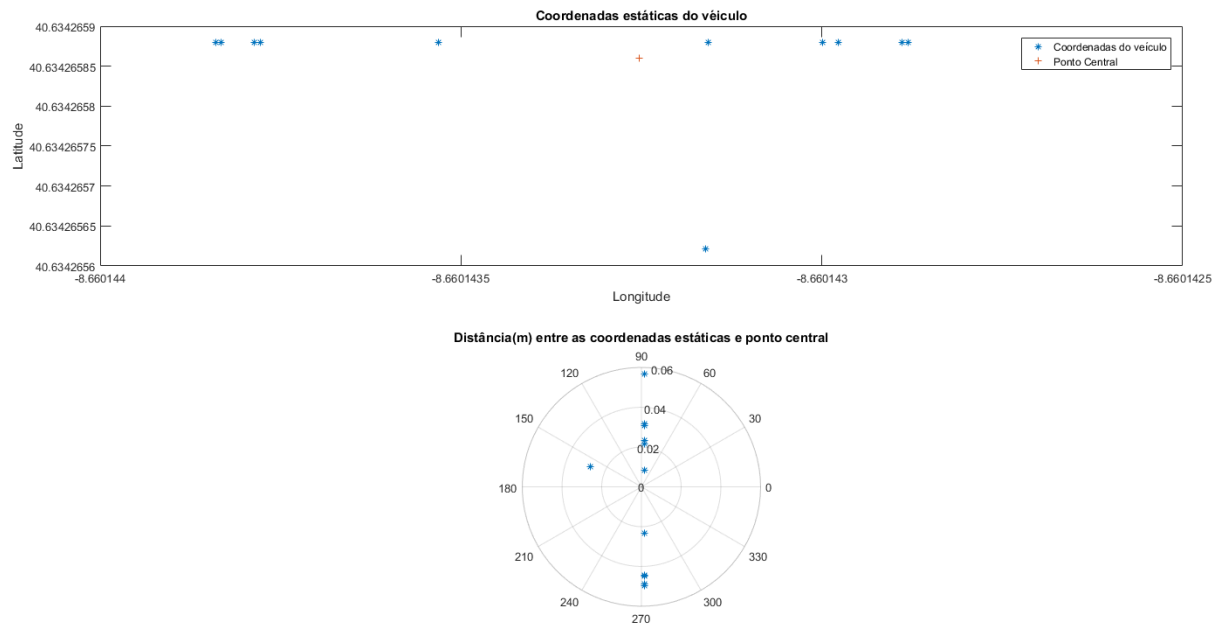


Figura 7.16: Diferença em metros de todas as experiências.

A distância entre os pontos centrais obtidos em todas as experiências anteriores está na ordem de grandeza dos centímetros. A distância máxima registrada da média de valores é de 6 cm.

No entanto, este sistema de posição por vezes não consegue obter a precisão RTK e fica preso no estado *Float* RTK. As próximas figuras analisam a posição do veículo quando acontece esta situação.

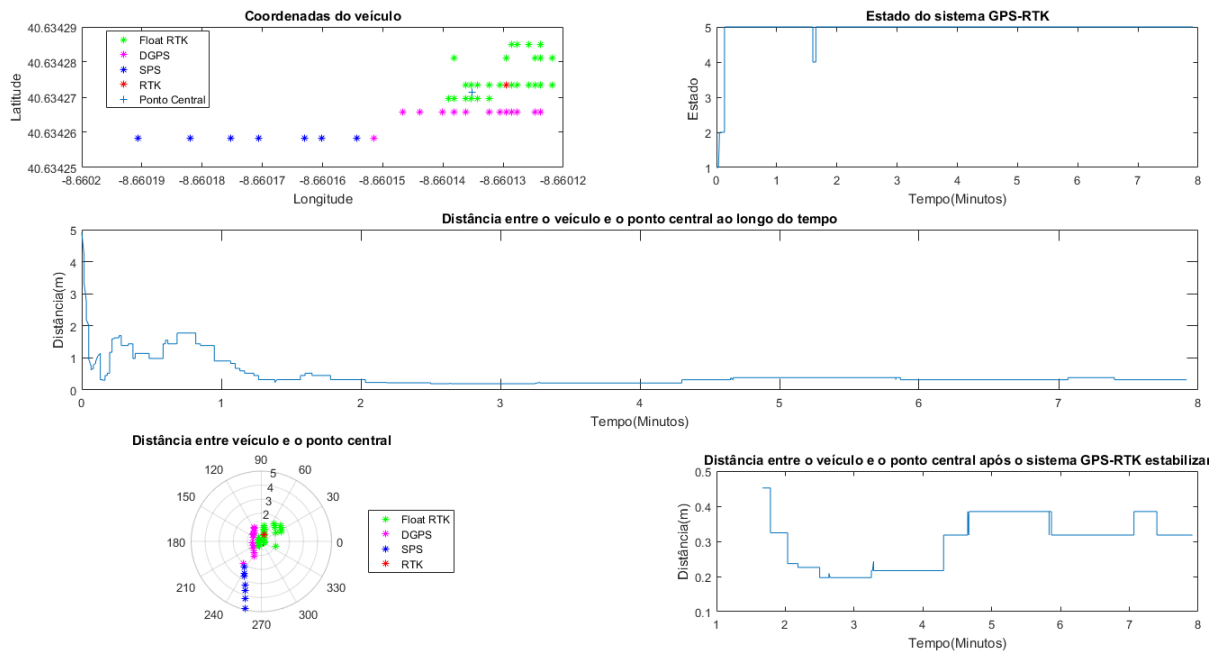


Figura 7.17: Resultados apenas com o estado Float RTK.

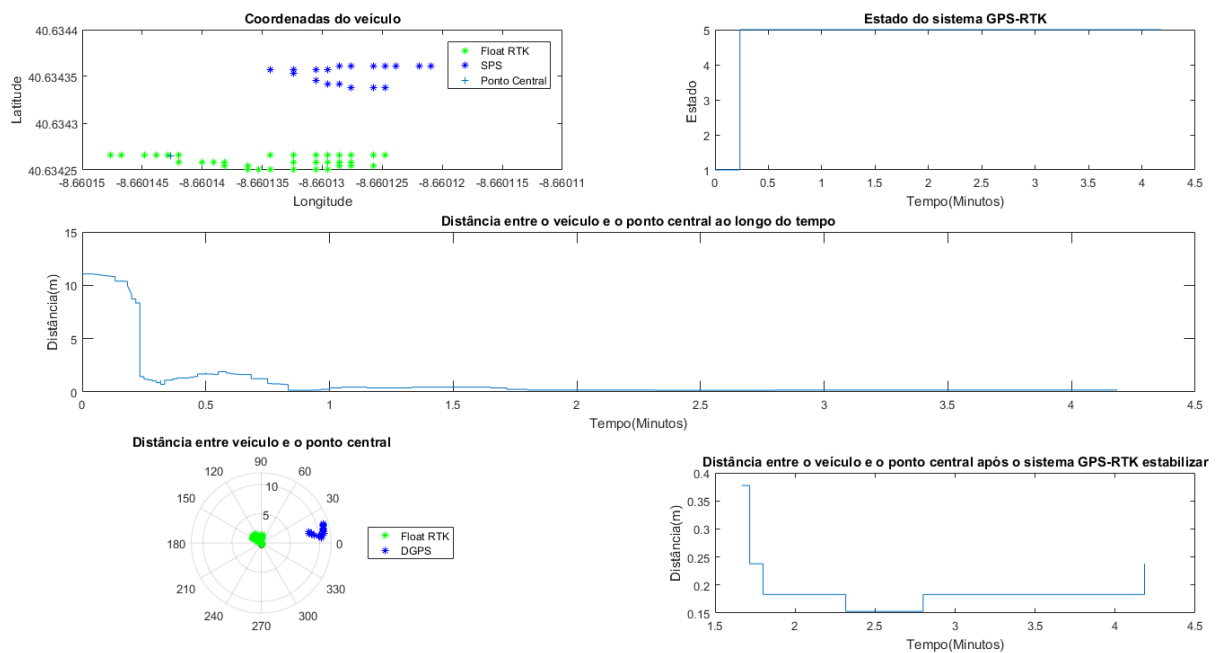


Figura 7.18: Resultados com o estado Float RTK.

As últimas duas figuras apresentadas demonstram que quando o sistema se encontra no estado *Float* RTK não possui a mesma precisão comparado ao estado RTK. Após o sistema de posição estabilizar, a posição do veículo oscila na casa dos decímetros.

O erro presente entre o estado *Float* RTK e RTK é demonstrado na seguinte figura:

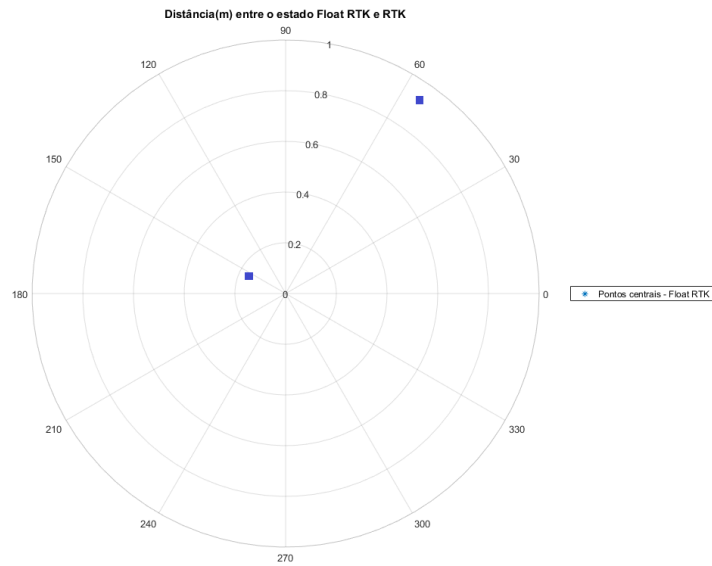


Figura 7.19: Diferença entre o resultados com o estado RTK e *Float* RTK.

Como se pode constatar, apesar da amostragem ser apenas de dois valores, o erro associado é inferior a 1 metro, tal como era esperado de acordo com as especificações do fabricante.

7.1.2 Comportamento do veículo ao longo do circuito

Para demonstrar o comportamento do veículo ao longo do carril metálico as próximas figuras demonstram gráficos que indicam a velocidade e a posição do veículo ao longo do tempo.

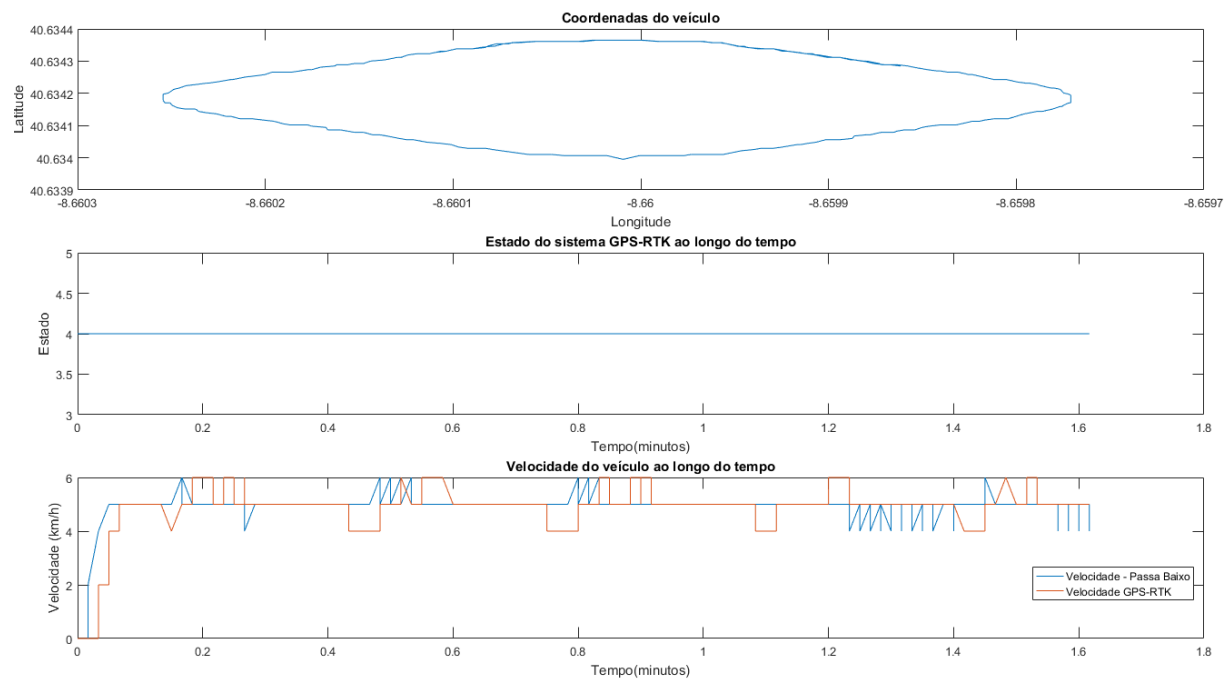


Figura 7.20: Circuito à velocidade 5 km/h.

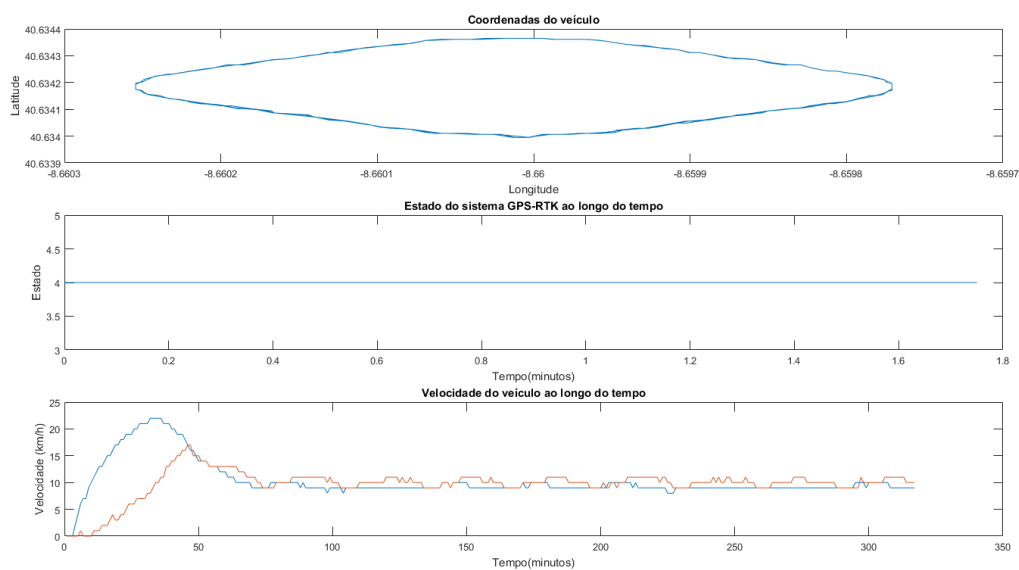


Figura 7.21: Circuito à velocidade 10 km/h.

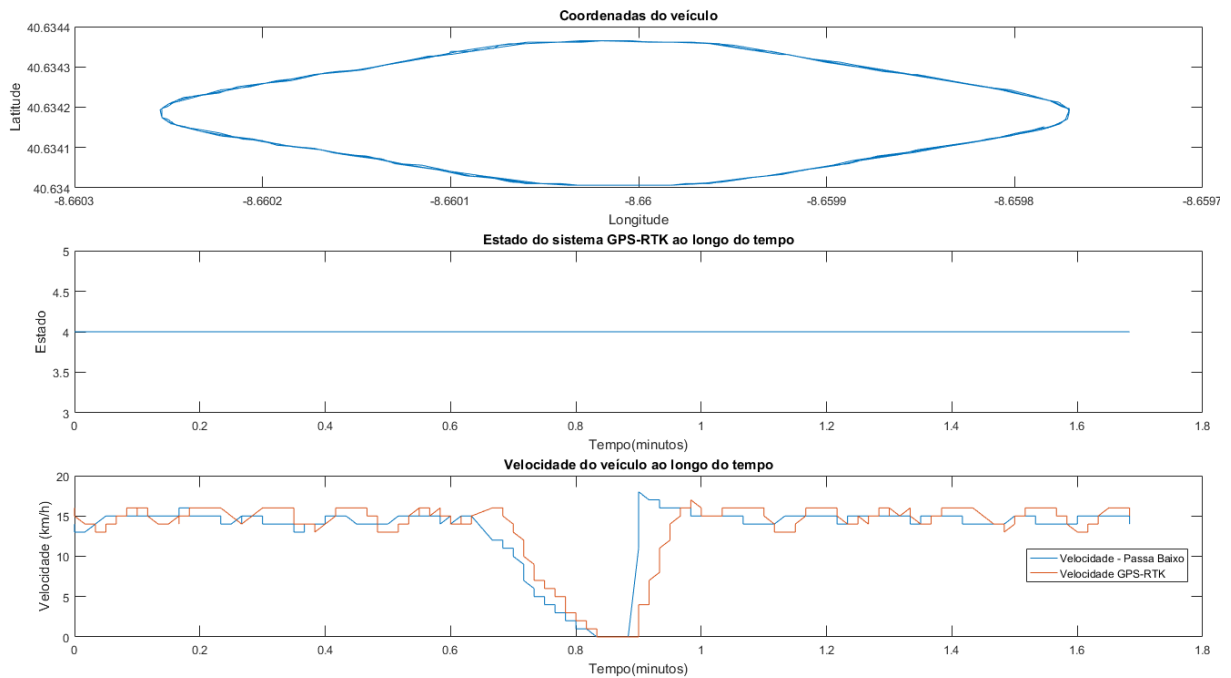


Figura 7.22: Circuito à velocidade 15 km/h.

O controlo de velocidade neste estágio não se encontra otimizado, visto que a roda motriz possui um mau contacto, levando à paragem do motor, o que impossibilitou a recolha de melhores resultados. Estes gráficos já possuem o controlo de velocidade de acordo com a velocidade do módulo GPS-RTK. No entanto, não foi possível implementar a última solução proposta na secção 6.1.2.

A próxima imagem demonstra os dados obtidos quando o sistema de posição não possui precisão RTK ao longo tempo.

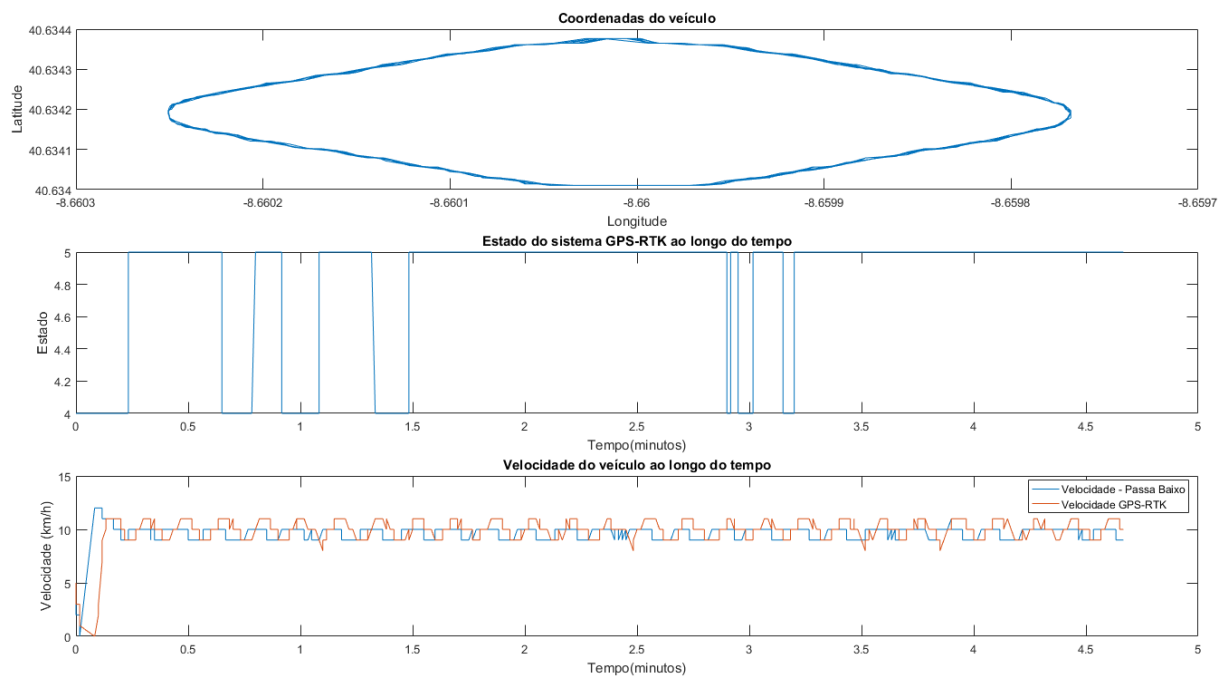


Figura 7.23: Circuito à velocidade 10 km/h sem precisão RTK.

A próxima imagem compara os dados obtidos na figura 7.21 com precisão RTK, e a figura 7.23 que possui precisão *Float* RTK.

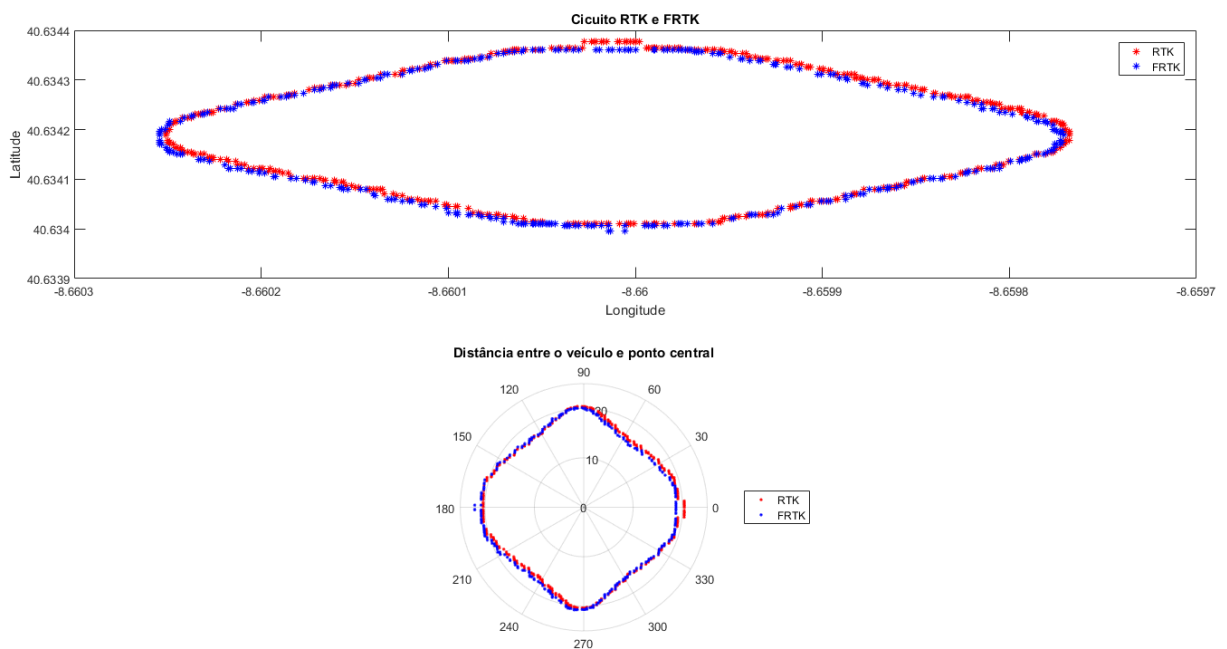


Figura 7.24: Diferença entre o estado RTK e o estado FRTK.

Tal como era esperado, com os resultados analisados quando o veículo permanecia imóvel,

existe uma pequena diferença entre estes dois estados, RTK e *Float* RTK. Quando o veículo se encontra em movimento, as trajetórias são bastantes similares, contudo, o maior erro registado é na curva do circuito, com um valor de 1.28 metros.

7.1.3 Trajetória do veículo consoante a posição da base

Ao longo do desenvolvimento deste sistema, foi necessário mudar a posição e as coordenadas da base, de modo a obter a melhor precisão possível. O próximo gráfico demonstra que a trajetória do veículo é sempre igual, contudo, as coordenadas do veículo sofrem um *offset* consoante as coordenadas da base.

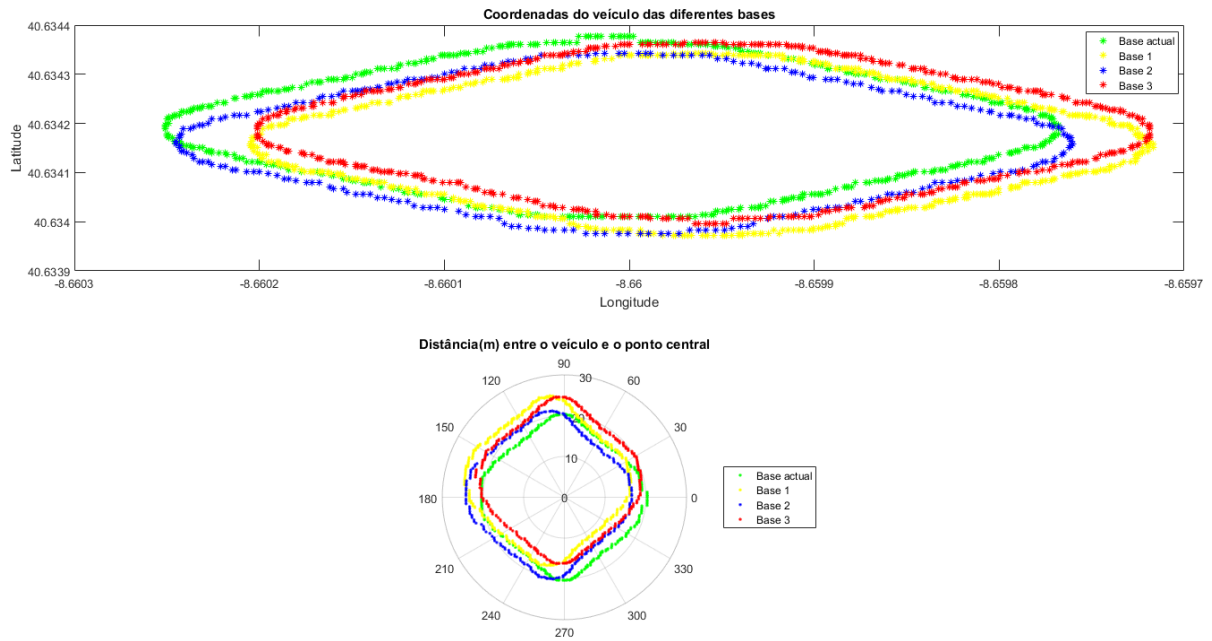


Figura 7.25: Registo da posição do veículo em função das coordenadas da base.

Capítulo 8

Conclusões

Esta tese de mestrado tinha como principal objetivo criar, na rede de testes, o controlo de um nó móvel sem fios. Este é efetuado por um módulo RF que consegue cobrir mais do que o terraço do Instituto de Telecomunicações, logo a probabilidade de ocorrer uma falha de comunicação é bastante reduzida.

A localização do veículo, que é efetuada por um sistema RTK, consegue oferecer ao utilizador a posição do veículo com uma precisão na ordem dos centímetros, após convergir para o estado RTK. No entanto, existem certos momentos que este sistema não consegue convergir, e fica estático no estado *Float* RTK. Os resultados apresentados demonstram que, para esta aplicação em questão, os valores continuam a ser válidos, com um erro inferior a 1 metro. O erro mais significativo ocorre quando o veículo efetua uma curva no circuito, porém, de acordo com algoritmo desenvolvido na interface gráfica, este consegue aproximar-se para a posição do circuito mais próxima.

O controlo de velocidade desenvolvido não está perfeito e necessita ainda de algum trabalho e, apesar da pequena amostra de resultados, estes foram os últimos valores a serem retirados antes da avaria do motor elétrico. Constata-se que a velocidade do veículo oscila significativamente do valor pretendido, sendo que a recolha dos valores de velocidade a partir do filtro passa baixo, possui um *offset* perto de 1 km/h com o valor lido com o sistema de posição. Também é de salientar, que o valor recolhido por parte do sistema de posição é bastante mais reativo às diferenças de velocidade impostas pela natureza do circuito, por isso, este pode ser considerado o principal método para efetuar o controlo da velocidade.

A interface gráfica apresenta uma forma simples e fácil para qualquer utilizador selecionar o estado que pretende impor no veículo e visualizar o seu comportamento em tempo real.

Em conclusão, apesar de todos os erros ocorridos ao longo da realização desta tese de mestrado, considero que contribui de forma positiva para o projeto Amazing, pelo que, os meus objetivos de trabalho foram concluídos com sucesso.

8.0.1 Trabalho futuro

Este sistema desenvolvido necessita aperfeiçoar várias áreas, tais como:

- **Controlo de velocidade:** É necessário aplicar a solução proposta e melhorar os parâmetros do PID até obter resultados satisfatórios. A introdução de um sistema de travagem mecânico pode melhorar a performance do veículo ao longo do circuito.

- **Placa PCB:** Criar caixas através de uma impressora 3D, para envolver placas que foram produzidas, de forma a ser possível efetuar testes em ambientes menos favoráveis.
- **Baterias:** Realizar um teste para verificar a duração das baterias, e assim determinar qual é a tensão mínima que as baterias podem apresentar.
- **Interface gráfica:** Apresentar ao utilizador informações de testes realizados. Apresentar informações mais detalhadas acerca do estado do veículo (potência, duração do teste, gráfico de velocidade).

Neste momento o veículo não se encontra-se operacional e é necessário resolver o mau contacto que existe entre roda motriz e controlador do motor elétrico.

Caso não seja possível solucionar este problema, penso que se deveria refletir sobre o sistema em si, o que pode levar a uma reformulação de todo o projeto desenvolvido nesta tese de mestrado, como por exemplo:

- **Motor elétrico:** Existem vários tipos de motores que são implementados para bicicletas elétricas, que precisam de uma menor fonte de alimentação e que conseguem fornecer a mesma velocidade e com a opção de trocar o sentido de rotação.
- **Sistema físico:** O veículo é bastante instável quando percorre o circuito a uma velocidade superior a 20 Km/h, o que é bastante perigoso caso o utilizador não coloque as rodas de apoio na posição correta.

A colocação do veículo no carril é bastante complicado devido ao seu peso e à forma que é necessário colocar as rodas de apoio.

O desgaste mecânico após várias voltas, por vezes faz criar uma folga na roda motriz o que provoca uma menor aderência ao circuito.

Bibliografia

- [1] Jaime E Villate. *Eletricidade, Magnetismo e Circuitos*. 2009.
- [2] Courseware Sample. *Electricity and New Energy Permanent Magnet DC Motor*. 2014.
- [3] Jian Zhao and Yangwei Yu July. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note. (July 2011):1–19, 2014.
- [4] Austin (University of Leeds) Hughes. *Electric Motors and Drives*. 2006.
- [5] Physics Section 6 - DIEGCSE. Online: <http://diegcse.weebly.com/physics-section-6.html>. Data de acesso: 2017-01-21.
- [6] How do DC motors work with respect to current, and what consequence is the current through them? - Electrical Engineering Stack Exchange. <https://electronics.stackexchange.com/questions/93710/how-do-dc-motors-work-with-respect-to-current-and-what-consequence-is-the-curre>. Data de acesso: 2018-12-11.
- [7] Ward Brown. Brushless DC Motor Control Made Easy. pages 1–48, 2002.
- [8] Vitor Paulino Gonzales. *Projeto de uma Bicicleta Elétrica*. PhD thesis, 2013.
- [9] Yedamale Padmaraja. AN885 Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. Technical report, Microchip Technology, 2003.
- [10] Texas Instruments. Wireless connectivity for IoT applications. Technical report, 2009.
- [11] Guillaume Girardin, Antoine Bonnabel, and Eric Mounier. Technologies and Sensors for Internet of Things: Business and Market Trends 2014-2024. Technical report, 2014.
- [12] Yang Shuang-Hua. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications*. 2013.
- [13] José Cecílio and Pedro Furtado. *Wireless Sensors in Heterogeneous Networked Systems*, volume 2. 2014.
- [14] Gil Reiter. Wireless connectivity for the Internet of Things. *Texas Instrument*, pages 1–13, 2014.
- [15] Silicon Laboratories Inc. Key Priorities for Sub-GHz Wireless Deployment Sub-GHz radios. Online: <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/Key-Priorities-for-Sub-GHz-Wireless-Deployments.pdf>. Data de acesso: 2018-12-12.

- [16] By Jay Tyzzer and Nordic Semiconductor. Easing the challenge of RF design (Part 1 of 2). *Antenna*, 2010.
- [17] Ramon Mayor Martins. Sistemas de Telecomunicação. 2016.
- [18] Amílcar Careli César. Propagação Zona de Fresnel. 2014.
- [19] Hung-Yu Wei. Wireless Channel and Radio Propagation. Online: <http://wmnlab.ee.ntu.edu.tw/951cross/Lec2.pdf>. Data de acesso: 2017-10-16.
- [20] Texas Instruments. TI Low Power RF - Designer's Guide to LPRF. page 64, 2010.
- [21] What is a duplex communication? - Polytechnic Hub. Online: <https://www.polytechnichub.com/what-is-a-duplex-communication/>. Data de acesso: 2017-10-20.
- [22] How to choose the best connectivity network for your project. Online: <https://publisher.opensensors.io/connectivity>. Data de acesso: 2017-10-25.
- [23] Technical Marketing Workgroup. LoRaWAN101. (November), 2015.
- [24] Smart parking technology. Online: <https://www.nwave.io/parking-technology/http://www.fastprk.com/>, 2016. Data de acesso: 2018-12-12.
- [25] Sigfox. Sigfox Technical Overview. 1(May):26, 2017.
- [26] Ì-Wave Alliance. About Z-Wave Technology - Z-Wave Alliance. Online: https://z-wavealliance.org/about{_}z-wave{_}technology/, 2016. Data de acesso: 2018-12-12.
- [27] C Jeffrey. *An Introduction to GNSS*. 2010.
- [28] GPS.gov: Control Segment. Online: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>, 2013. Data de acesso: 2018-05-18.
- [29] Oscar Isoz. *Interference Detection and Localization in the GPS L1 Frequency Band*. PhD thesis, 2012.
- [30] JAXA | Positioning to know your location and time. Online: http://global.jaxa.jp/countdown/f18/overview/gps{_}e.html. Data de acesso: 2018-11-10.
- [31] Jan Van Sickle and John A. Dutton. Real-Time Kinematic and Differential GPS | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. Online: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1828>, 2016. Data de acesso: 2018-05-26.
- [32] GMV. GNSS Augmentation. Online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GNSS{_}Augmentation{&}action=edit. Data de acesso: 2018-12-12.
- [33] Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller | Mr. Digital. Online: <https://nicisdigital.wordpress.com/2011/06/27/proportional-integral-derivative-pid-controller/>. Data de acesso: 2018-11-27.

- [34] Switch Types and Common Terminology - National Instruments. Online: <http://www.ni.com/white-paper/3960/pt/http://www.ni.com/white-paper/3960/en/>, 2016. Data de acesso: 2018-09-27.
- [35] Oersted's Compass - MagLab. Online: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/orsted-s-compass>. Data de acesso: 2018-10-20.
- [36] Magnetism: Crash Course Physics. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=s94suB5uLWw&t=166s>. Data de acesso: 2017-01-13.
- [37] Raghunath Srivatsa. Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle Using a BLDC Motor. (June):1–24, 2014.
- [38] Johan Wiberg. *Controlling a Brushless DC Motor in a Shift-by-Wire System*. PhD thesis, 2003.
- [39] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15):2787–2805, 2010.
- [40] António Grilo. Wireless Sensor Networks Chapter 2 : Single node architecture. pages 1–26, 2013.
- [41] Artur (FEUP) Moura. Antenas e Propagação. 2014.
- [42] Campbell Scientific. Line of Sight Obstruction. *Application Note 3RF-E*, 2016.
- [43] LoRa Alliance. About LoRaWAN | LoRa Alliance. Online: <https://loro-alliance.org/about-lorawan>, 2018. Data de acesso: 2018-12-12.
- [44] Mehdi Anteur, Vincent Deslandes, Nathalie Thomas, and Andre Luc Beylot. Ultra narrow band technique for low power wide area communications. *2015 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2015*, pages 1–6, 2015.
- [45] Alasdair Gilchrist. *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. 2016.
- [46] Peder Rand. What is Cellular IoT. Online: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/what-is-cellular-iot>. Data de acesso: 2018-12-12.
- [47] Z-Wave. Z-Wave | Z-Wave Smart Home Products are the #1 choice for smart homes. Online: <https://www.z-wave.com/learn>, 2018. Data de acesso: 2018-12-12.
- [48] GPS.gov: Space Segment. Online: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, 2015. Data de acesso: 2018-05-18.
- [49] Glonass history. Online: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>. Data de acesso: 2018-05-19.
- [50] Programme | European GNSS Service Centre. Online: <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/programme>. Data de acesso: 2018-05-18.

- [51] Novo lançamento de satélite amplia alcance global do Galileo / Portugal / ESA in your country / ESA. Online: <https://www.esa.int/por/ESA{ }in{ }your{ }country/Portugal/Novo{ }lançamento{ }de{ }satellite{ }amplia{ }alcance{ }global{ }do{ }Galileo>. Data de acesso:2018-05-18.
- [52] BeiDou Global Navigation Satellite System. Online: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php>, 2012. Data de acesso: 2018-05-24.
- [53] Teresa Manuela and Lopes De Sousa. *Análise de Erros em Receptores de GNSS*. PhD thesis, 2007.
- [54] El Mowafy Ahmed and Al Musawa Mustafa. Machine automation using RTK GPS positioning. *2009 6th International Symposium on Mechatronics and its Applications, ISMA 2009*, pages 1–6, 2009.
- [55] Trimble Navigation. *Real-Time Kinematic (RTK) Systems: Training Guide*. Number 33142. 2003.
- [56] António Pereira de Melo. *Teoria dos sistemas de controlo lineares*. 2010.

Capítulo 9

Apêndice

9.1 Placa PCB

A placa PCB desenvolveu-se através do *software* Altium Design e agrupa todos os esquemas demonstrados ao longo deste capítulo.

9.1.1 Placa embutida no veículo

A próxima imagem ilustra a distribuição dos módulos associados ao veículo na placa PCB.

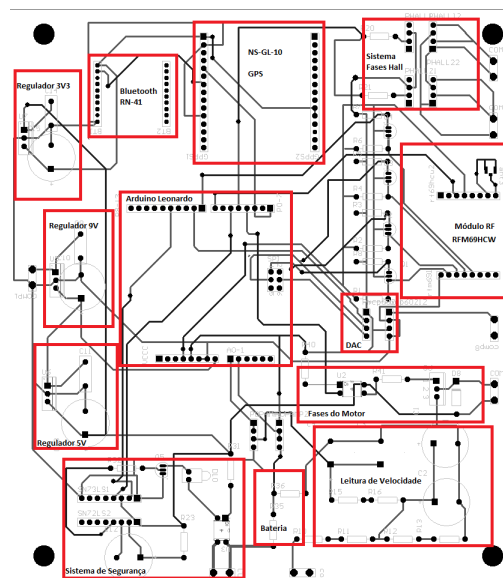


Figura 9.1: Disposição dos módulos na placa PCB embutida no veículo.

A ligação entre a placa PCB e o circuito do motor elétrico está ilustrada na seguinte imagem:

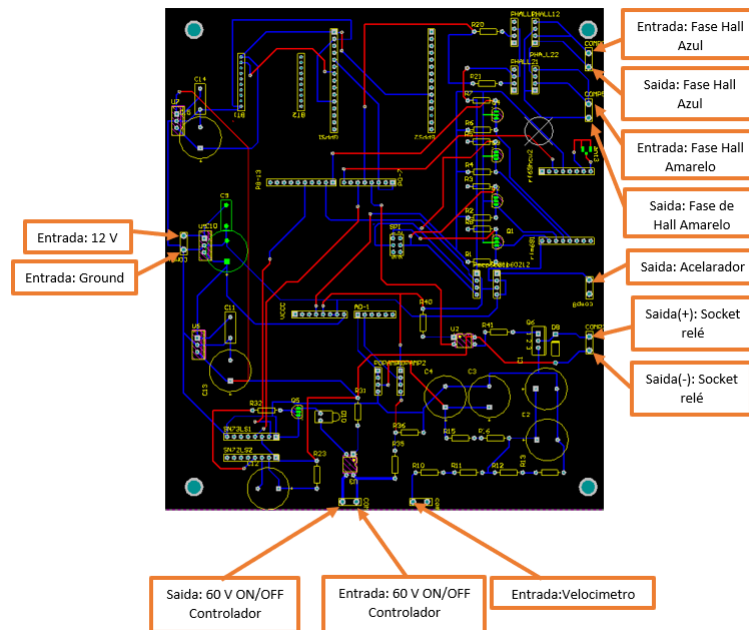


Figura 9.2: Ligação entre a placa PCB e o controlador do motor elétrico.

9.1.2 Placa PCB fixa

Esta placa está ligada diretamente ao Raspberry Pi. Inclui os módulos associados à posição e à comunicação RF. A próxima figura demonstra como estes estão distribuídos na placa PCB.

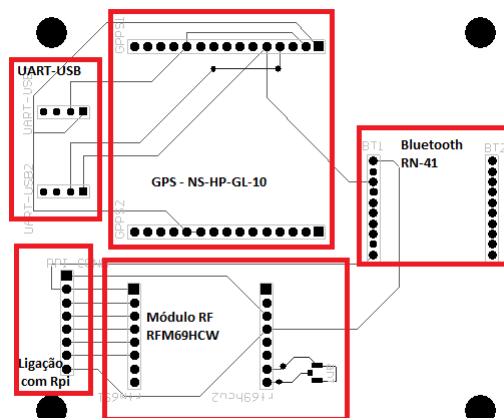


Figura 9.3: Distribuição dos módulos na placa PCB fixa.

As ligações necessárias entre esta placa e o Raspberry Pi estão explícitas na seguinte imagem:

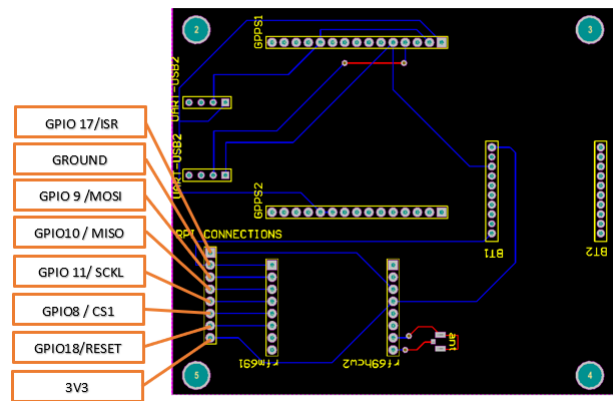


Figura 9.4: Ligação entre placa PCB e o Raspberry Pi 3.